

УДК 539.3

Ткаченко Э. А. /д. т. н./,
 Ермакратьев В. А. /к. т. н./,
 Гришин В. С. /к. т. н./
 «НМетАУ»

Методика расчета несущей способности шпинельсодержащих футеровок металлургических агрегатов

Предложена методика расчета несущей способности футеровок на основе $MgAl_2O_4$ шпинелей в рамках трехмерной линеаризованной теории устойчивости деформируемых тел. Рассмотрен механизм разрушения, вызванный потерей поверхностной устойчивости в процессе циклического термомеханического нагружения слоистых футеровок. Ил. 3. Библиогр. 8 назв.

Ключевые слова: устойчивость, слоистость, термические и силовые напряжения, трещиностойкость

Methodology of calculation of loadbearing of lining-ups on the base of $MgAl_2O_4$ spinels within the frame of three-dimensional linearized theory of stability deformable body is suggested. The mechanism of destruction of lining-up is considered as a result of cracking caused by the loss of superficial stability in the process of cyclic termomechanical loading of the stratified lining-ups.

Keywords: stability, stratified, thermal and power tensions, crack growth resistance

Введение

В качестве футеровки элементов конструкций и агрегатов металлургического оборудования часто используются многослойные огнеупорные материалы с различными геометрическими, физико-механическими и теплофизическими характеристиками слоев. Изменение количества слоев в них позволяет существенно улучшить межслоевую адгезию, эксплуатационные свойства и стойкость к фильтрации шлаков и стали. При многократных повторениях термомеханических воздействий, термические напряжения, за счет стеснения температурной деформации, могут привести к появлению новых форм равновесия элементов футеровки и, следовательно, к потере устойчивости в упругой области и локальному выпучиванию поверхностных слоев.

При сочетании термических и механических нагрузок выпучивание может привести к резкой потере несущей способности футеровки в связи со значительным формоизменением слоистой структуры. Однократные кратковременные температурные нагружения в цикле теплосмены опасны главным образом для материалов в хрупком состоянии (огнеупоры, керамика). Ввиду неоднородности структурных составляющих и анизотропии их теплового расширения и упругих свойств на стыках блоков возникают значительные термические напряжения, которые имеют объемный характер. Зарождение и развитие трещин приводит к нарушениям прочности и нередко к локальному разрушению макрообъемов футеровки.

Изменение размеров и формы футеровки в

целом при повторных теплосменах связано с макроскопическими термическими напряжениями, которые вызывают реализацию явления волнообразования и локального выпучивания. Одним из возможных механизмов начала процесса выпучивания слоев футеровки принято считать явление поверхностной неустойчивости, реализующегося в приповерхностной зоне и затухающего при удалении от нее.

Проблема несущей способности слоистых защитных покрытий с привлечением трехмерной линеаризованной теории устойчивости деформируемых твердых тел рассмотрена в работах [1, 2] в рамках модели кусочно-однородных сред при малых и конечных докритических деформациях. В работах [3, 4] предпринята попытка обобщить подходы, на случай совместного воздействия силовых и температурных факторов в задачах устойчивости слоистых элементов конструкций общего назначения. В рамках точного подхода получены решения задач устойчивости слоистых сред при малых докритических деформациях гиперупругих материалов слоев, к которым относятся огнеупорные и керамические материалы [5]. Наилучшей, с точки зрения сопротивляемости резко возрастающим термическим напряжениям, формой элементов слоистой среды являются круглые цилиндры [6]. Поэтому влияние уровня температурного поля в зоне контакта рабочих поверхностей элементов конструкций металлургического оборудования на несущую способность футеровок рассматривается на примере разливочного стакана машины непрерывного разлива заготовок.

Постановка задач

Режимные изменения температуры в зоне контакта расплава с футеровкой включают три

стадии. На первой стадии происходит разогрев зоны барьерной части футеровки от начальной температуры T_0 до определенного стационарного уровня $T^* = T_{распл.}$. На второй стадии, по времени наиболее продолжительной, температура рабочей поверхности футеровки практически не изменяется, а градиент температуры по толщине стенки барьерного слоя определяет температуру на границе раздела с расплавленной шпинелью футеровки. Третья стадия характеризуется медленным изменением температуры от T^* до ее первоначального значения. При этом величина $\delta = (T^* - T_0) / T_0$ находится в интервале $1 < \delta < 15$. Зона контакта между буферным слоем футеровки и расплавом моделируется двумя полуограниченными телами, одно из которых является многослойной средой, а другое – ограниченным объемом расплава стали. Каждый слой и полупространство отнесены к системе локальных лагранжевых координат $x_i^{(K)}$, где $i = \overline{1,3}$; $K = \overline{1, K+1}$; K – количество слоев в футеровке (рис. 1).

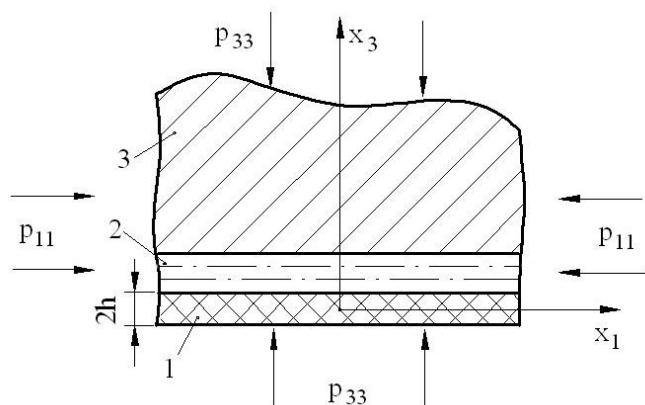


Рис. 1. Плоская модель упругой стесненной деформации футеровки, сопряженной с однородным полупространством под действием системы сжимающих нагрузок p_{ii} : 1 – барьерная зона футеровки; 2 – неспеченный забарьерный объем футеровки; 3 – оболочка сталеразливочного стакана

Принято реакцию взаимодействия между слоистой футеровкой и расплавом описывать системой поверхностных распределенных нормальных нагрузок интенсивностью p_{33} , приложенных к ограничивающим поверхностям сред. Решение задачи даже при однородном докритическом состоянии, с учетом температурного поля, представляет собой весьма сложную математическую и вычислительную проблему [1]. Рассматривается случай, когда исследуется поверхностная неустойчивость слоистой футеровки, сопряженной с расплавом стали, а реакция их взаимодействия заменяется системой поверхностных распределенных нагрузок следящего характера. Такой вид нагрузок p_{33} позволяет установить предельные значения сжимающих усилий p_{ii} , при которых возможно появление локального выпучивания в футеровке в результате реализации явления потери поверхностной устойчивости в структуре слоистого элемента сталеразливочного стакана.

Между отдельными слоями футеровки и полупространством предполагаются условия полного контакта. На бесконечности выполняются условия затухания возмущения компонент вектора перемещений \vec{u} . При этом исследуется неустойчивость в структуре слоистого тела, когда критические значения параметров нагружения и волнообразования зависят только от соотношения между геометрическими и механическими характеристиками отдельных слоев футеровки, а не от размеров и формы всего элемента конструкции сталеразливочного стакана. Для определенности принято, что физико-механические свойства слоев и полупространства описываются моделью линейного упругого трансверсально-изотропного или изотропного тела. В общем случае решение описанной проблемы представляет собой сложную задачу, так как в указанном диапазоне изменения параметра δ уравнения теплопроводности и термоупругости являются нелинейными [7]. Принято, что температурное поле влияет только на докритическое напряженно-деформированное состояние слоистой футеровки. Используя такой подход, считается, что все линейаризованные соотношения постановочного характера, приведенные в работах [1, 2], остаются без изменения. Изменяются лишь входящие в коэффициенты линейаризованных уравнений устойчивости выражения для докритического напряженного состояния и физико-механические характеристики слоистой среды, если последние существенно зависят от температуры.

Методика решения

Докритическая деформация. Определение докритического состояния потери устойчивости слоистой футеровки сводится к решению задач о термонапряженном состоянии в квазистатической трехмерной постановке для рассматриваемого полупространства при заданных температурных и силовых граничных и межслоевых условиях. В случае изотропной модели слоев и полупространства для определения напряжений при температуре \hat{T} используется соотношение Дюгамеля-Неймана [3]:

$$\sigma_{ij}^0 = 2\mu \varepsilon_{ij}^0 + [\lambda \varepsilon_{kk} + (3\lambda + 2\mu) \alpha_T (\hat{T} - T_0)] \delta_{ij}^0 \quad (1)$$

где $\sigma_{ij}^0, \varepsilon_{ij}^0$ – компоненты тензоров напряжений и деформаций в докритическом состоянии; λ, μ – коэффициенты Ляме; α_T – линейный коэффициент термического расширения; $|\hat{T}|$ – средняя установившаяся температура.

Поскольку на первой и третьей стадиях деформирования предполагается медленное и монотонное изменение температуры, то принято, что максимальное влияние температурного фактора на состояние равновесия тела проявится на второй стадии, где температурное поле можно считать установившимся. Поэтому целесообразно ограничиться рассмотрением стационарного температурного поля, которое реализуется на второй стадии рассматриваемого теплового

процесса. Принято предположение о том, что с ростом величины $|\hat{T}|$ возрастает зона прогрева буферной зоны в направлении координаты $x_3^{(K)}$. Поэтому в пределах области возмущенного состояния, в которой реализуется явление поверхностной неустойчивости, величина $(\hat{T} - T_0)/T_0$ изменяется незначительно. Приближенно температурное поле в этой области считается однородным с температурой на поверхности барьерного слоя $T = T_{расч}$. Влияние температурного поля на процесс потери устойчивости слоистого полупространства можно оценить через значения физико-механических характеристик слоев футеровки и полупространства, определяемых экспериментально при различных значениях температуры \hat{T} . Таким образом, окончательно постановка задачи сводится к постановке, изложенной в работе [3] но при этом для упругих постоянных a_{ij}, G_{ij} используются их значения, полученные при температурах $T = \hat{T}$.

Для определения докритических напряжений, обусловленных постоянной температурой, в случае однородного докритического состояния выражения для определения докритических напряжений определяется из условия равновесия рассматриваемого полупространства с учетом (1). При плоской деформации, когда материал слоев и полупространства линейно упругий, ортотропный или изотропный, докритические напряжения в i -ом слое имеют вид:

$$\sigma_{11}^0 = -P_{11} \left[\left(1 - \nu \frac{a_{11}}{a_{33}} \right)_{(K+1)} \frac{(a_{11} - a_{13}^2 a_{33}^{-1})_{(i)}}{(a_{11} - a_{13}^2 a_{33}^{-1})_{(K+1)}} - \nu \frac{a_{13}^{(i)}}{a_{33}^{(i)}} \right] \quad (2)$$

$$- \theta \left[\left(\beta_{11} - \beta_{33} \frac{a_{13}}{a_{33}} \right)_{(i)} - \left(a_{11} - \frac{a_{13}^2}{a_{33}} \right)_{(i)} \frac{\left(\beta_{11} - \beta_{33} \frac{a_{13}}{a_{33}} \right)_{(K+1)}}{\left(a_{11} - \frac{a_{13}^2}{a_{33}} \right)_{(K+1)}} \right] \quad (3)$$

где $\beta_{ii} = a_{ii}^T C_{\text{эла}}$ при $i = 1, 3$; $\theta = \hat{T} - T_0$; $C_{\text{эла}}$ - компоненты тензора упругой жесткости однородного тела. При получении формул (2, 3) использовались условия равенства докритических деформаций $\varepsilon_{11}^0 = \varepsilon_{11}^0 = \varepsilon_{11}^0$.

Характеристическое уравнение. Задача устойчивости исследуемого слоистого полупространства рассматривается при малых докритических деформациях для случая плоской деформации. При однородном докритическом решении уравнений устойчивости в пределах каждого элемента слоистой среды выражается через функцию $\psi_i^{(K)} (i = 1, 3; K = \overline{1, K+1})$, которые, в свою очередь, удовлетворяют уравнениям

$$\frac{\partial^2 \psi_i^{(K)}}{\partial x_3^{(K)2}} + \eta_i^{(K)} \frac{\partial \psi_i^{(K)}}{\partial x_1^{(K)2}} = 0 \quad (4)$$

где в пределах каждого элемента имеем

$$\eta_{13}^2 = c \pm \left[c^2 - \frac{(a_{11} - P_{11})(G_{13} - P_{11})}{(a_{22} - P_{33})(G_{13} - P_{33})} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$2c(a_{33} - P_{33})(G_{13} - P_{33}) = (a_{11} - P_{11})(a_{22} - P_{33}) + (G_{13} - P_{33})(G_{13} - P_{11}) - (a_{13} + G_{13})^2 \quad (6)$$

В зависимости от уровня напряжения и физико-механических свойств среды коэффициенты $\eta_i^{(K)}$ могут быть вещественными или комплексными величинами.

Между элементами слоистой среды предполагается выполнение условий полного контакта, которые в возмущениях можно записать

$$\begin{aligned} P_i^{(K)}(x_1^{(K)}, x_3^{(K)} + 0) &= P_i^{(i)}(x_1^{(i)}, x_3^{(i)} - 0), \quad i = K + 1 \\ u_i^{(K)}(x_1^{(K)}, x_3^{(K)} + 0) &= u_i^{(i)}(x_1^{(i)}, x_3^{(i)} - 0), \quad i = 1, 3 \end{aligned} \quad (7)$$

На «бесконечности» выполняются условия затухания

$$u_i^{(K+1)}(x_1^{(K+1)}, x_3^{(K+1)}) \rightarrow 0 \quad \text{или} \quad x_3^{(K+1)} \rightarrow 0 - \infty \quad (8)$$

На поверхности среды ($x_3^{(0)} = 0$) граничные условия задаются в напряжениях

$$P_i^{(0)}(x_1^{(0)}, 0) = \tilde{P}_i, \quad (9)$$

где $P_i^{(K)}(x_1^{(K)}, x_3^{(K)})$ - компоненты возмущений главного вектора напряжений на поверхности сопряжения k -го элемента среды; \tilde{P}_i - компоненты возмущений поверхностной нагрузки. При следящих нагрузках [3]

$$\tilde{P}_i = P_{33} \left(N_i \frac{\partial u_n^{(0)}}{\partial x_n^{(0)}} - N_n \delta_{in} \frac{\partial u_n^{(0)}}{\partial x_p^{(0)}} \right) \quad (10)$$

Здесь по повторяющимся индексам производится суммирование. Для построения разрешающих характеристических уравнений используется матричный подход, изложенный в работе [1]. Из условия существования нетривиальных решений систем уравнений находится характеристическое уравнение для определения критических значений параметров задачи, обуславливающих явление поверхностной неустойчивости в исследуемых футеровках:

$$\det \| a_{ij} + a_{i,j+2} \| = 0, \quad (11)$$

где a_{ij} - элементы матрицы коэффициентов системы алгебраических уравнений, к решению которых окончательно сводится исходная задача.

Элементы матрицы из (11) не приводятся ввиду их громоздкости. Для поиска минимальных корней уравнения (11) используется метод бисекции. В результате решения уравнения (11) при фиксированных значениях параметров слоистой футеровки определяется графическая зависимость между минимальными значениями его корней и параметрами волнообразования ω :

$$P^* = f(\omega) \tag{12}$$

$$P_1^* = (P_{11}/E_1^{(r-n)})_{\min}$$

Минимизируя зависимость (12) по параметрам P^*, ω , находятся критические значения этих величин, обуславливающие явление потери устойчивости в структуре слоистой футеровки.

В ситуации, когда неспеченная масса забарьерной части футеровки сохраняет в течение всего цикла теплосмен вязкотекучие свойства, образуется подповерхностный слой с очень низкими жесткостными характеристиками, называемый в структурной механике «некомпетентным» слоем. В результате возможна реализация потери устойчивости в единичном буферном слое, как элемента конструкции раньше, чем произойдет поверхностная потеря устойчивости слоистой кусочно-однородной среды в целом. Тогда рассматривается устойчивость единичного слоя толщиной $2h$ под действием сжимающих поверхностных распределенных «мертвых» или следящих нагрузок p_{33} . В плоскости простираения слоя на него действует сжимающая нагрузка p_{11} (см. рис. 1).

При завершении цикла теплосмены, а следовательно, отсутствия внешних температурных и силовых нагрузок в упругом теле разливаемого стакана происходит релаксация напряжения и деформации.

Решение конкретной задачи

Рассматривается несущая способность футеровки сталеразливочных стаканов машин непрерывного литья заготовок. Эффект низкой фильтрации шлаков и стали достигается путем спекания футеровочной шпинельсодержащей тиксотропной массы на глубину 30-40 мм в виде буферной стенки, за которой масса сохраняет свои исходные свойства [8].

Спеченные шпинельные алюмомагнезиальные огнеупоры обладают прочностными свойствами, идентичными плавленным материалам. Неспеченная масса забарьерной части футеровки обладает чистотой состава, сплошностью, относительно невысокой механической прочностью. Специфические технологические методы формирования слоистых футеровок позволяют легко очищать изношенную футеровку от шлака и стали и соединять вскрытый слой с вновь наносимым вторичным огнеупорным материалом без расслоений по границе раздела слоев. Рассматривается случай, когда потеря устойчивости барьерного слоя приводит к разрушению футеровки как элемента конструкции

Рассмотрены результаты решения задачи для двухслойного пакета сопряженного с наружной чугушной оболочкой стакана и внутренним объемом расплава стали. Принят материал буферного слоя и чугушной оболочки линейноупругим, изотропным. В этом случае имеем зависимости:

$$a_{11} = a_3 = \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} ; a_{33} = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} ; G_{13} = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{13}$$

$$G_{11} = -P_{11} \left[\frac{\nu_i}{1-\nu_i} + \frac{n_i(1-\nu_{x,n})}{1-\nu_i} \left(1 - \frac{\nu_{x,n}}{1-\nu_{x,n}} \right) \right] + \frac{G_i}{g_{x,n}(1-\nu_i^2)} \left[\alpha_T^{(2)}(1+\nu_i) - \alpha_T^{(r-n)}(1+\nu_{x,n}) \right] \tag{14}$$

где E_i, ν_i - модуль упругости и коэффициент Пуассона i -го слоя соответственно.

Подстановкой (13), (14) в соотношение (11) в явном виде получено разрешающее характеристическое уравнение. Для определенности считаем, что исследуемая среда из двух слоев, сопряжена с однородной полуплоскостью, а нагрузка p_{33} является следящей. Температура изменяется от 20 до 1500 °С. Материал слоев соответственно: шпинель MgO/Al₂O₃ спеченная при температуре 1650 °С и неспеченная; основания - чугун.

В качестве параметров задачи фиксируются величины:

$$y = p_{33}/p_{11}; \rho_i = h_i/H; \nu_i; \nu_j; n_i = E_i/E_3; \omega = (\pi H)/l.$$

Здесь $H = h_1 + h_2; i = 1, 2; l$ - длина полуволны формы потери устойчивости.

В соответствии с данными [8, 9] имеем. При T_0 : $n_1 = 1,875; n_2 = 10^{-1}; \nu_1 = 0,25; \nu_2 = 0,32; \nu_3 = 0,22; \rho_1 = 0,3; \rho_2 = 0,7; y = 0 \div 1,7$. При T : $n_1 = 1,6; n_2 = 10^{-1}; \nu_1 = 0,2; \nu_2 = 0,32; \nu_3 = 0,22; \rho_1 = 0,3; \rho_2 = 0,7; y = 0 \div 3,5; \alpha_T^{(1)} = 0,85 \cdot 10^{-5}$ град⁽⁻¹⁾; $\alpha_T^{(2)} = 2,6 \cdot 10^{-5}$ град⁽⁻¹⁾; $\alpha_T^{(3)} = 1,1 \cdot 10^{-5}$ град⁽⁻¹⁾.

Решение характеристического уравнения (11) частично представлено на рис. 2, 3 в виде графиков зависимости $P_1^* \sim \omega$, а цифрами возле кривых указано значение параметра y . Рис. 2 построен для случая, когда $T = T_{0r}$ а рис. 3 - $T = T_s$.

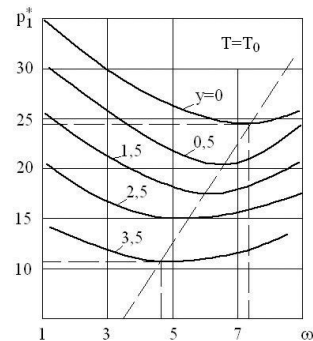


Рис. 2. Зависимость критических параметров устойчивости футеровки от параметра нагружения y при $T = T_0$

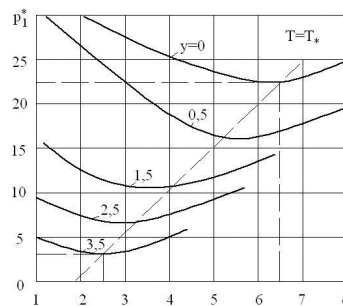


Рис. 3. Зависимость критических параметров устойчивости футеровки от параметра нагружения y при $T = T_s$.

В качестве параметров нагружения и волнообразования, при которых может реализоваться явление приповерхностного выпучивания слоистой футеровки выбираются те значения P_{1kp}^* и ω_{kp}

которые минимизируют кривые на графиках рис. 2, 3. При этом из анализа этих результатов можно сделать выводы о том, что наличие нагрузки и технологического уровня температуры T^* существенно изменяет значения параметров $p_{1кр}^*$ и $\omega_{кр}$, и приводит к новым качественным и количественным результатам. В частности из рис. 2 следует, что с увеличением параметра y уменьшается значение $p_{1кр}^*$ и $\omega_{кр}$. Повышение температуры поверхностных объемов барьерного слоя до $T = T_*$ приводит к уменьшению критических значений $p_{1кр}^*$ и $\omega_{кр}$ при одних и тех же значениях параметра y . Из рис. 3 следует, что увеличение температуры приводит к изменению того предельного значения y , при котором происходит резкое уменьшение параметра волнообразования. Например, при $y = 3,5$ в случае $T = 20$ °C $\omega_{кр} = 4,6$, а при $T_* = 1500$ °C $\omega_{кр} = 2,5$. В рассмотренном примере одновременное повышение температуры и увеличение поверхностной нагрузки $p_{3з}$ в результате заполнения сталеразливочного стакана, приводит к уменьшению критических значений параметра $p_{1кр}^*$. Если при $y = 0$ и $T = 20$ °C состояние равновесия рассматриваемой слоистой футеровки можно считать устойчивым, то при $y = 3,5$ и $T_* = 1500$ °C при определенных условиях в ней может реализоваться явление потери поверхностной устойчивости. При этом с уменьшением критических значений $p_{1кр}^*$ происходит смещение параметров формоизменения поверхности футеровки в область коротковолновых величин $\omega_{кр}$.

Выводы

Циклические смены температуры и температурных напряжений, превышающих предельные значения реализации формы потери устойчивости, приводят к развитию поля остаточных напряжений, исключающего возможность равномерной деформации футеровки по толщине буферной зоны стенки. Явление «приспособляемости» футеровки имеет место, когда термосиловое напряжение, найденное из упругого решения, не превышает предельного значения в реализации необратимой поверхностной неустойчивости.

Библиографический список

1. Гузь А. Н. Поверхностное выпучивание многослойных покрытий регулярной структуры / А. Н. Гузь, Э. А. Ткаченко, В. С. Стукотилов, В. Н. Чехов // Докл. НАН Украины. – 1996. – № 9. – С. 66-70.
2. Ткаченко Э. А. Исследование устойчивости слоистых покрытий в трехмерной постановке при различных видах нагружения / Э. А. Ткаченко, В. Н. Чехов // Теоретическая и прикладная механика. – 2001. – № 32. – С. 34-40.
3. Ткаченко Э. А. Совместное влияние температуры и поверхностных сжимающих нагрузок на устойчивость многослойных упругих покрытий при малых докритических деформациях / Э. А. Ткаченко, В. Н. Чехов // Прикладная механика. – 1998. – № 8. – С. 32-39.
4. Ткаченко Э. А. Устойчивость слоистых покрытий при двухосном термосиловом нагружении / Э. А. Ткаченко, В. Н. Чехов // Прикладная механика. – 2009. – Т. 45. – № 12. – С. 107-115.
5. Ткаченко Э. А. Устойчивость многослойных покрытий с внешним керамическим слоем / Э. А. Ткаченко, В. Н. Чехов // Прикладная механика. – 2012. – № 1. – С. 73-84.
6. Фрийдман Я. Б. Механические свойства металлов. В 2-х частях. Ч. 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. М.: Машиностроение, 1974. – 368с.
7. Огибалов П. М. Термоустойчивость пластин и оболочек // П. М. Огибалов, В. Ф. Грибанов / М.: Изд-во МГУ, 1968. – 518 с.
8. Sarcar R., Banerjee G. Effect of composition Variation and Fineness on the Densification of MgO-Al₂O₃ compacts // J. Eur. Ceram. Soc. 1999. – № 19. – P. 2893-2899.

Поступила 25.05.2014

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

В редакции можно приобрести по льготной цене авторские экземпляры журнала.

Просим заблаговременно подать заявку для формирования тиража.

контактный телефон 056-744-81-66

(факс) 0562-46-12-95