

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКА $ZrO_2$

*Составлен алгоритм процесса моделирования горячего прессования порошков  $ZrO_2$  при прямом пропускании переменного электрического тока, основой которого является модель Эшби для ГИП. Приведенные карты горячего прессования при прямом пропускании переменного электрического тока порошков  $ZrO_2$  позволяют найти давление и температуру процесса ГП для получения относительной плотности  $\rho = 1,0$  за различное время.*

**Ключевые слова:** диоксид циркония, нанопорошки, горячее прессование.

**Введение.** В настоящее время применяются эффективные методы, позволяющие спекать порошки различных тугоплавких материалов, при этом обеспечивая получение наноструктурных материалов. Для получения наноструктурных материалов из тугоплавких соединений, в том числе нетокопроводных, в последнее время расширяется практика использования техники и технологий FAST-метода спекания электрически активированным внешним полем. Метод спекания импульсным током (SPS – Spark plasma sintering) широко известный в мире под разными названиями - plasma activated sintering (PAS) или pulse electric current sintering (PECS) в Японии, Plasma pressure compaction (PPC) в США, instrumented pulse electrodischarge consolidation или resistance/spark sintering under pressure в Корее, позволяет производить объемные плотные материалы в течение нескольких минут при применении высоких скоростей нагрева и малом времени выдержки. Метод горячего прессования с прямым пропусканием тока позволяет так организовать процесс консолидации, чтобы избежать проблем, связанных с чрезмерной интенсивностью зернограничной диффузии: рост зерен, приводящий к увеличению диффузионного пути по границе, что замедляет процесс спекания. А возможность избежания аномального роста (превышение некоторыми зернами среднего размера) позволяет получать материалы с высокими механическими свойствами.

Однако, разница температуры в зоне спекания, установленная в процессе исследования температурного поля при горячем прессовании, которая непосредственно влияет на плотность и соответственно на физико-химические свойства образца, вызывает необходимость обратиться к моделированию данного процесса.

**Цель исследования.** Данная работа направлена на рассмотрение процесса горячего прессования с прямым пропусканием тока порошков диоксида циркония с разными размерами частиц с целью получения качественной модели уплотнения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В качестве основы для модели уплотнения при горячем прессовании (ГП) была взята модель горячего изостатического прессования (ГИП), предложенная М.Ф. Эшби с соавторами [1, 2]. Модель уплотнения при ГИП основана на одновременной возможности протекания процессов пластической деформации, дислокационной ползучести, ползучести Набарро-Херринга, а также массопереноса в результате объемной и граничной диффузии. Эта модель использовалась многочисленными авторами для оценки изменения плотности при горячем изостатическом прессовании различных порошков: металлических (медь, сталь, тантал, бериллий [2–5]), окислов  $Al_2O_3$ ,  $UO_2$  [2, 6], сплавов Ti-Al [7] и т. д.

**Материалы и результаты исследований.** Проведены эксперименты с целью получения плотных образцов оксида циркония и изучения применения модели Эшби для описания горячего прессования (ГП) при прямом пропускании переменного электрического

тока порошков оксида циркония с диаметрами 3 мкм и 0,3 мкм. Давление прессования 45 МПа, время прессования 2, 5 и 10 минут.

Для построения диаграмм или карт ГП  $ZrO_2$ , т. е. графиков зависимости относительной плотности от размеров порошка и параметров прессования (давления, температуры и времени) использовали следующие данные по оксиду циркония (табл. 1) [8].

**Таблица 1. Свойства оксида циркония**

№ п/п	Свойства $ZrO_2$	Значение
1	Атомный объем, $\Omega$ , м <sup>3</sup>	$3,36 \cdot 10^{-29}$
2	Вектор Бюргерса, $b$ , м	$5,1 \cdot 10^{-10}$
3	Температура плавления, $T_m$ , °К	2985
4	Предел текучести, $\sigma_y$ , МПа	4000
5	Модуль сдвига при 300 °К, $\mu_0$ , МПа	$9,6 \cdot 10^4$
6	$T_m d\mu / \mu_0 dT$	-0,8
7	Объемная диффузия, $D_{0v}$ , м <sup>2</sup> /сек	$3,1 \cdot 10^{-6}$
8	Зернограничная диффузия, $\delta D_{0b}$ , м <sup>3</sup> /сек	$1,5 \cdot 10^{-12}$
9	Зернограничная диффузия, $Q_b$ , кДж/моль	309
10	Ползучесть, $n$	2
11	Ползучесть, $A$	$5 \cdot 10^{-4}$

Модель Эшби предусматривает две стадии уплотнения. На начальной стадии процесса ( $\rho_0 < \rho < 0,9$ ) происходит рост шеек контактов первоначально сферических частиц порошка радиуса  $R$  и увеличение числа контактов. Частицы распределены случайным образом и имеют одинаковый размер. Уплотнение моделируется благодаря увеличению радиусов частиц вокруг фиксированных центров. Новый радиус  $R'$  частицы определяется как:

$$R' = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/3} R, \quad (1)$$

где  $\rho$  – относительная плотность и  $\rho_0$  – исходная относительная плотность (для случайной упаковки  $\rho_0 = 0,64$ ). При росте радиусов сфер происходит их частичное перекрытие с ближайшими соседями. Объем перекрытия вычисляется и перераспределяется в пустом пространстве, увеличивая при этом радиус шейки и число контактов с соседними частицами.

Число контактов отдельной частицы со своими соседями  $Z$  связано с относительной плотностью  $\rho$  следующим образом:

$$Z = 12\rho. \quad (2)$$

$Z$  увеличивается от величины 7,7 с начала ГИП, что соответствует случайной упаковке частиц порошка с  $\rho_0 = 0,64$ , до 12, когда достигается полная теоретическая плотность. Средняя площадь контакта частицы равна:

$$s = \frac{\pi (\rho - \rho_0)}{3 (1 - \rho_0)} R^2. \quad (3)$$

При этом радиус контактной шейки  $x$  связан с плотностью следующим выражением:

$$x = \sqrt{\frac{s}{\pi}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{\rho - \rho_0}{1 - \rho_0} \right\}^{1/2} R. \quad (4)$$

А радиус кривизны поверхности контактной шейки равен:

$$\gamma = \frac{x^2}{2(R-x)} \cong R(\rho - \rho_0). \quad (5)$$

Под воздействием внешнего давления  $P$  в местах контакта частиц возникает среднее усилие  $f$ , которое равно:

$$f = \frac{4\pi R^2}{Z\rho} P, \quad (6)$$

а, следовательно, эффективное давление  $P'$  в каждой точке контакта может быть определено как

$$P' = \frac{f}{s} = \frac{(1-\rho_0)}{\rho^2(\rho-\rho_0)} P, \quad (7)$$

при этом  $P'$  стремится к  $P$  при приближении  $\rho$  к единице.

При  $0,9 < \rho < 1$  пористость становится закрытой и распределяется равномерно в угловых точках многогранников, представляющих собой поверхность частиц на заключительной стадии прессования. Радиус пор  $r$  определяется следующим соотношением:

$$r = R \left\{ \frac{1-\rho}{6} \right\}^{\frac{1}{3}}. \quad (8)$$

Внутреннее давление газа закрытых пор может существенно затруднить достижение верхнего предела плотности. Это внутреннее давление  $P_i$  равно:

$$P_i = P_0 \frac{(1-\rho_c)\rho}{(1-\rho)\rho_c}, \quad (9)$$

где  $P_0$  – остаточное давление газа в закрытых порах,  $\rho_c$  – относительная плотность, при которой поры закрываются.

Рассмотрим уравнения для расчета плотности при пластической деформации и скоростей уплотнения при диффузии, дислокационной ползучести и ползучести Набарро-Херринга.

*Пластическая деформация.* При достижении определенного давления ( $P' > 3\sigma_y$ , где  $\sigma_y$  – предел текучести материала) частицы порошка уплотняются, благодаря действию пластической деформации. При этом происходит увеличение площади контактов частиц. Уплотнение, обеспечиваемое пластической деформацией, на начальной стадии определяется следующим уравнением:

$$\rho_{pl} = \left( \frac{(1-\rho_0)P}{1,3\sigma_y} + \rho_0^3 \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (10)$$

На заключительной стадии уплотнения относительная плотность, по рассматриваемому механизму, равна:

$$\rho_{pl} = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{P}{\sigma_y}\right). \quad (11)$$

Далее, уплотнение происходит за счет процессов диффузии и ползучести.

*Диффузия.* Уплотнение на этой стадии происходит благодаря движению материала от зоны контакта между частицами порошка к поверхности образовавшейся шейки путем зернограницной и объемной диффузии. Скорость диффузионного уплотнения на начальной стадии уплотнения описывается уравнением:

$$\dot{\rho}_1 = \frac{43(1-\rho_0)^2 (\delta D_b + \gamma D_v)}{(\rho - \rho_0)^2 kTR^3} \Omega P, \quad (12)$$

где  $D_v$  – коэффициент объемной диффузии,  $D_b$  – коэффициент диффузии по границам зерен,  $\delta$  – эффективная толщина границы зерна,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $\Omega$  – атомный объем. На заключительной стадии уплотнения уравнение для скорости диффузионного уплотнения имеет вид:

$$\dot{\rho}_1 = 54 \frac{\Omega(\delta D_b + r D_v)}{kTR^3} \sqrt[5]{1-\rho} P. \quad (13)$$

*Ползучесть.* Уплотнение при давлении также может осуществляться деформационной ползучестью в местах контакта частиц. Ползучесть подчиняется степенному закону:

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\sigma_0$  и  $n$  – параметры материала,  $\varepsilon$  – скорость деформации,  $\sigma$  – действующее напряжение. На начальной стадии скорость уплотнения при ползучести определяется из выражения:

$$\dot{\rho}_2 = 5,3(\rho^2 \rho_0)^{1/3} \cdot \frac{x}{R} \left( \frac{\dot{\varepsilon}_0}{\sigma_0^n} \right) \left( \frac{P'}{3} \right)^n, \quad (15)$$

и на заключительной — из уравнения

$$\dot{\rho}_2 = \frac{3}{2} \left( \frac{\dot{\varepsilon}_0}{\sigma_0^n} \right) \frac{\rho(1-\rho)}{[1-(1-\rho)^{1/n}]^n} \left( \frac{3}{2n} P \right)^n. \quad (16)$$

*Крип Набарро-Херринга и Кобле.* Данный механизм реализуется в условиях ГИП, когда размер зерна существенно меньше размеров частиц порошка. На начальной стадии скорость уплотнения определяется из уравнения:

$$\dot{\rho}_3 = 24,9 \frac{\Omega}{kTG^2} (\rho^2 \rho_0)^{1/3} \cdot \frac{x}{R} \left( D_v + \frac{\pi \delta D_b}{G} \right) P', \quad (17)$$

и на заключительной — из уравнения

$$\dot{\rho}_3 = 31,5 \frac{\Omega}{kTG^2} (1-\rho) \left( D_v + \frac{\pi \delta D_b}{G} \right) P, \quad (18)$$

где  $\bar{G}$  – средний размер зерна.

Таким образом, относительную плотность определяется путем суммирования относительной плотности, получаемой при заданной температуре и давлении, за счет пластической деформации и суммы произведений скоростей уплотнения (диффузия, ползучесть, крип Набарро-Херинга) на время прессования:

$$\rho = \rho_{pl} + \sum_{i=1}^n \dot{\rho}_i \Delta t. \quad (19)$$

Модель Эшби была разработана для описания действующих механизмов уплотнения в условиях горячего изостатического прессования. Для использования этой модели для предсказания механизмов уплотнения при горячем прессовании с прямым пропусканием переменного электрического тока нами было проведена следующая модификация модели Эшби. Ситуация осложняется тем, что точные механизмы повышения плотности при горячем прессовании с прямым пропусканием переменного электрического тока

до настоящего времени не описаны в полной мере. В частности, нет экспериментально установленного факта существования плазмы или других типов поверхностных эффектов, вызванных присутствием электрического поля. Поэтому, моделирование процессов горячего прессования с прямым пропуском переменного электрического тока часто имеет оценочный характер.

Во-первых, необходимо учесть тот факт, что при аксиальном прессовании напряжение сжатия точно известно, тогда как радиальная составляющая напряжения неизвестна и обычно имеет меньшее значение, чем аксиальное напряжение. А значит, более низкие радиальные напряжения будут вызывать понижение эффективной скорости уплотнения по сравнению с предсказанной скоростью уплотнения для гидростатического прессования. Поэтому необходимо модифицировать уравнение, описывающее скорость уплотнения в случае аксиального прессования. С этой целью Besson и Abouaf [4] предложили ввести фактор, включающий функцию локального напряжения. Отношение скорости уплотнения порошка  $\dot{\rho}$  к относительной плотности  $\rho$  выражается через скорость объемной деформации  $\dot{\varepsilon}$  следующим образом:

$$-\frac{\dot{\rho}}{\rho} = \dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33}. \quad (20)$$

Были получены уравнения для скоростей деформации в случае горячего прессования и горячего изостатического прессования, используя фактор локального напряжения. Применяя уравнение (20) для ГП и ГИП и разделив полученные два результата, получили фактор локального напряжения, который показывает насколько скорость уплотнения при ГП ниже по отношению к ГИП для каждого из действующих механизмов уплотнения. Фактор локального напряжения равен:

$$F = \left\{ \frac{c(\rho)}{c(\rho) + 4f(\rho)} \right\}^{0,5}, \quad (21)$$

где  $c = 1 + \{k_1(1-\rho)\}^{k_2}$  и  $f = k_3(1-\rho)^{k_4}$ . Функции  $c$  и  $f$  были получены по кривым соответствующих экспериментальных данных на различных материалах. Величины  $k_1, k_2, k_3, k_4$ , соответственно, равны 28,55, 1,678, 20,18 и 1,572. Далее, для использования подхода Эшби к описанию процессов горячего прессования мы умножили уравнения скорости уплотнения при ГИП на фактор локального напряжения  $F$  (21).

Во-вторых, известно, что при пропуске электрического тока через прессовку из порошка, как это происходит при FAST, в зонах межчастичных контактов могут возникать электрические разряды, вызывающие образование плазмы. А это, в свою очередь, приводит к очистке и активации поверхности спекаемых порошков [5]. Очистка поверхности частиц порошка приводит к образованию чистых границ зерен. Таким образом, необходимо учесть в модели горячего прессования при прямом пропуске переменного электрического тока очистку порошков во время прессования от поверхностных примесных оксидных пленок. Другими словами необходимо учесть, как будет влиять чистота порошка на процесс его уплотнения во время прессования. Влияние примесей может быть учтено, благодаря использованию примесно-модифицированных: объемной диффузии, зернограничной диффузии, поверхностной энергии и зернограничной энергии. Известно, что поверхностная энергия и зернограничная энергия уменьшаются с увеличением содержания примесей [7]. Уравнение для свободной поверхностной и зернограничной энергии разбавленных растворов представлено следующим образом:

$$\Delta\gamma_{\text{пов/згр}} = RT\Gamma_b^0 \left[ 1 - \frac{\Gamma_b}{\Gamma_b^0} \right], \quad (22)$$

где

$$\frac{\Gamma_b}{\Gamma_b^0} = \beta_b X_c, \quad (23)$$

$$\Gamma_b^0 = \frac{1}{N_a a_{\text{раст}}^2}, \quad (24)$$

где  $\Gamma_b^0$  – количество раствора в моль/м<sup>2</sup>,  $N_a$  – число Авогадро,  $\beta_b$  – коэффициент обогащения и  $X_c$  – концентрация в мольных долях сегрегированных частей. Изменения в поверхностной энергии и зернограничной энергии равны:

$$\gamma_{\text{пов}}^{\text{прим}} = \gamma_{\text{пов}} - \Delta\gamma_{\text{пов}}; \quad (25)$$

$$\gamma_{\text{згр}}^{\text{прим}} = \gamma_{\text{згр}} - \Delta\gamma_{\text{згр}}. \quad (26)$$

Объемная диффузия в материале с сегрегированными примесями:

$$D_v^* = D_v(1 + b_v X_c), \quad (27)$$

где  $b_v$  – коэффициент сегрегации. Фактор сегрегации может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от материала. Зернограничная диффузия изменяется как

$$D_b^* = D_b \left[ 1 + \left\{ b_v - \frac{2\Delta}{m_i} \times \left( \frac{a_{\text{рраст}}}{a_{\text{раст}}} \right)^2 \beta_b \right\} X_c \right], \quad (28)$$

где  $m_i$  – число эффективных слоев атомов примеси,  $a_{\text{рраст}}$  – размер растворенного атома,  $a_{\text{раст}}$  – размер атома растворителя,  $\Delta$  – ширина границы зерна. Число слоев примеси на границе зерна равно:

$$m_i = \frac{\Delta}{a_{\text{раст}}}. \quad (29)$$

Вышеприведенные уравнения используются только для разбавленных систем. Для очень загрязненных систем дифференцированный подход основан на следующих соображениях. Так как диффузия зависит от изменения активационной энергии, следующие уравнения были использованы для оценки изменения активационной энергии и предэкспоненциального множителя. Изменения активационной энергии для граничной диффузии в зависимости от содержания примесей представляется как:

$$Q_b^{\text{прим}} = Q_b + N_a \alpha'_{\text{прим.1}} a_{\text{раст}}^2 + N_a \alpha'_{\text{прим.2}} a_{\text{раст}}^2 + \dots \quad (30)$$

в зависимости от примесной сегрегации на границе зерна [7]. Решеточная активационная энергия изменяется в зависимости от содержания примесей в теле или на поверхности как:

$$Q_v^{\text{прим}} = \frac{3}{2} Q_b^{\text{прим}} \quad (31)$$

или

$$Q_v^{\text{прим}} = Q_v + \Delta E, \quad (32)$$

где  $\Delta E$  – активационная энергия, связанная с уменьшением миграции дефектов, благодаря торможению дефектов примесными атомами. Предэкспоненциальный множитель для диффузии в системе со следами примесей и в системе, загрязненной примесями, модифицируется следующим образом:

$$D_0^{\text{прим}} = D_0 \exp\left(\frac{-\delta S}{R}\right) \exp\left(\frac{-C}{RT}\right) \quad (33)$$

и

$$\delta S = \frac{\lambda \delta Q}{T_m} \left\{ \frac{T_m}{G_0} \times \frac{\partial G}{\partial T} \right\}, \quad (34)$$

где  $\lambda$  – константа, равная 0,55 для ГЦК и 1 для ОЦК материалов,  $G$  – модуль сдвига,  $T_m$  – температура плавления,  $\delta Q$  – разница в активационной энергии, благодаря присутствию примесей и  $C \sim 10 \dots 50$  кДж/моль. Следует учитывать, что разрушение оксидных пленок и, таким образом, очистка частиц порошка происходит очень быстро на первой стадии прессования. В модели при  $\rho_0 < \rho < 0,9$  переходили от диффузии в системе, загрязненной примесями, к системе с отсутствием примесей.

Кроме эффекта очистки порошка во время проведения процессов FAST, необходимо также учесть при моделировании изменение температуры, которое происходит благодаря воздействию электрического тока. Приложенное электрическое поле приводит к образованию градиента температур вокруг пор, благоприятно влияющего на уплотнение больших пор. На промежуточных стадиях спекания в области пор различного размера образуется градиент заряда. Электросопротивление увеличивается по мере увеличения концентрации эквивалентных линий. Плотность электрического тока выше в районе больших пор. Это создает градиент температуры, т. е. температура более высокая в районе больших пор. Райченко получил уравнение для расчета градиента температур  $\Delta T$  в районе поры радиусом  $r$  [9]:

$$\Delta T \approx \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\Theta_0 T_0 E_0^2 \Delta \tau}{2C_m n}}, \quad (35)$$

где  $\Theta_0$  – электропроводность,  $C_m$  – теплоемкость,  $T_0$  – начальная температура,  $E_0$  – напряженность электрического поля,  $\Delta \tau$  – время действия электрического поля,  $n$  – число электрических импульсов.

Таким образом, был составлен алгоритм процесса моделирования горячего прессования порошков  $ZrO_2$  при прямом пропускании переменного электрического тока, основой которого является модель Эшби для ГИП. На рис. 1 представлена блок-схема программы для расчета относительной плотности прессованных материалов в зависимости от приложенного напряжения, температуры и времени.

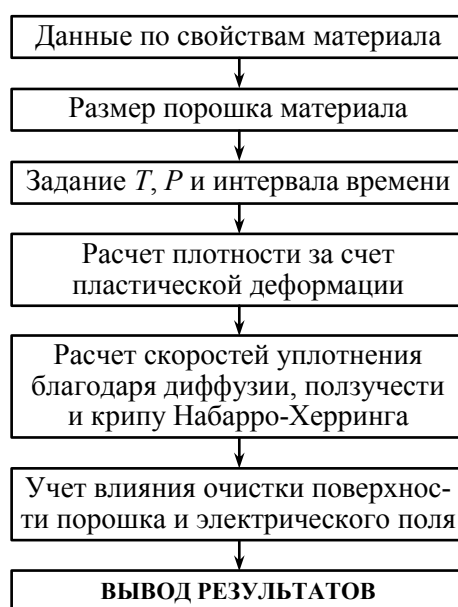


Рис. 1. Блок-схема программы расчета карт горячего прессования при прямом пропускании переменного электрического тока

На рис. 2, 3 показаны результаты моделирования ГП при давлении прессования 45 МПа в диапазоне температур 1000–1300 °С порошков  $ZrO_2$  3 и 0,3 мкм. При горячем прессовании при прямом пропускании переменного электрического тока порошков  $ZrO_2$  с диаметром порошка, равным 0,3 мкм наблюдается увеличение отклонения моделируемых значений плотности от экспериментальных с уменьшением температуры прессования. Модель не «обеспечивает» достаточной плотности при данных режимах прессования. По-видимому, в данном случае, не удастся в достаточной мере учесть влияние электрического тока в процессе прессования. FAST процесс может достаточно сильно изменить известные кинетические механизмы, что приведет к изменению соответствующих коэффициентов диффузии, энергий активации и характерных уравнений, описывающих указанные процессы.

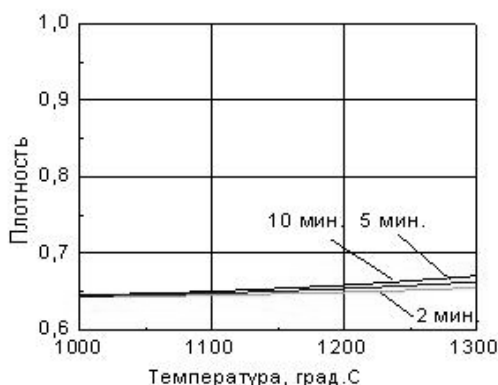


Рис. 2. Зависимость относительной плотности прессуемого порошка  $ZrO_2$  (диаметр 3 мкм) от температуры горячего прессования при давлении  $P = 45$  МПа

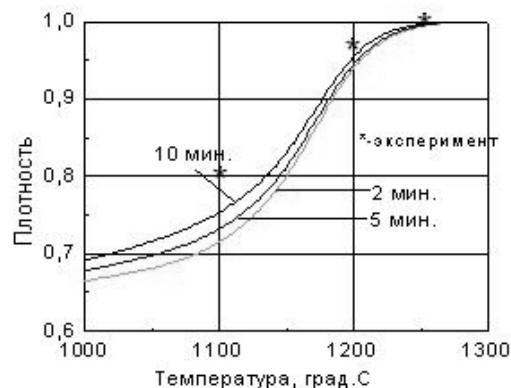


Рис. 3. Зависимость относительной плотности прессуемого порошка  $ZrO_2$  (диаметр 0,3 мкм) от температуры горячего прессования при давлении  $P = 45$  МПа

Приведенные карты (рис. 2, 3) горячего прессования при прямом пропускании переменного электрического тока порошков  $ZrO_2$  позволяют найти давление и температуру процесса ГП для получения относительной плотности  $\rho = 1,0$  за различные времена. Карты ГП показывают значения давления и температуры, которые необходимы для порошка с размером частиц 0,3 мкм, чтобы получить из них заготовки с относительной плотностью 0,9 и 1,0. Хорошо видна тенденция изменения параметров ГП ( $P$  и  $T$ ) в зависимости от времени процесса (1 мин., 5 мин. и 10 мин.). Сравнение рис. 2 и 3 показал характер изменения карт ГП в зависимости от размера частиц порошка. Видно, что для получения определенной величины относительной плотности за одинаковое время процессов необходимо увеличить давление и температуру ГП при использовании более крупнозернистых порошков.

**Выводы.** Проведено моделирование процесса ГП порошка  $ZrO_2$  с размерами 3 мкм и 0,3 мкм. Построены карты горячего прессования при прямом пропускании переменного электрического тока порошков  $ZrO_2$ . Определены оптимальные параметры (давление и температура) процесса ГП для получения максимальной плотности. Как показано и другими авторами [10], основным механизмом уплотнения при ГП порошков  $ZrO_2$  является зернограничная диффузия.

#### Литература

1. Wilkinson, D.S. Pressure sintering by powder law creep [Text] / D.S. Wilkinson, M.F. Ashby // *Acta Metall.* – 1975. – Vol. 23, № 11. – P. 1277–1285.
2. Arzt, E. Practical Applications of Hot-Isostatic Pressing Diagrams [Text]: Four Case Studies / E. Arzt, M.F. Ashby, K.E. Easterling // *Met. Trans.* – 1983. – Vol. 14A, P 211–221.



3. Helle, A.S. *Hot-Isostatic Pressing Diagrams: New Developments [Text]* / A.S. Helle, K.E. Easterling and M.F. Ashby // *Acta Metall.* – 1985. – Vol. 33, № 12 – P. 2163–2174.
4. Besson, J. and Abouaf, M., *J. Am. Ceram. Soc.* – 1992, 75 (8). – P. 2165.
5. Schneider, J.A. *Surface Effects in Field-Assisted Sintering [Text]* / J.A. Schneider, J.R. Groza and M. Garcia // *Mater. Res.* – 2001. – 16 (1) – P. 286–292.
6. Anderson, K.R. *Surface Oxide debonding in field assisted powder sintering [Text]* / K.R. Anderson, J.R. Groza, M. Fendorf, C.J. Echer // *Mater. Sci. Engin.* – 1999. – A270. – P. 278–282.
7. Hondros, E.D. *Physical Metallurgy [Text]* / E.D. Hondros and M.P. Seah; ed. R.W. Cahn and P. Haasen. *Elsivier, Amsterdam, 1993.*
8. Kim, J.-Y. *Hot isostatic pressing of Y-TZP powder compacts [Text]* / J.-Y. Kim, S. Okamoto, N. Uchida, K. Uematsu. *J. Mater. Sci.* – 1990. – 25. – P. 4634–4638.
9. Райченко, А.И. *Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока [Текст]* / А.И. Райченко. – М.: *Металлургия, 1987.* – 128 с.
10. Kim, J.-Y. *Analysis of Hot Isostatic Pressing of Presintered Zirconia [Text]* / J.-Y. Kim, N. Uchida, K. Saito, K. Uematsu. *J. Am. Ceram. Soc.* – 1990. – 73 (4). – P. 1069–1073.

© Э.С. Геворкян, О.М. Мельник

**Е.С. Геворкян, д.т.н., проф., О.М. Мельник, асп.**

Українська державна академія залізничного транспорту, м. Харків

### **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКУ $ZrO_2$**

*Складено алгоритм процесу моделювання гарячого пресування порошків  $ZrO_2$  при прямому пропусканні змінного електричного струму, основою якого є модель Ешбі для ГП. Наведені карти гарячого пресування при прямому пропусканні змінного електричного струму порошків  $ZrO_2$  дозволяють знайти тиск і температуру процесу ГП для отримання відносної щільності  $\rho = 1,0$  за різний час.*

**Ключові слова:** диоксид цирконію, нанопорошки, гаряче пресування.

**E.S. Gevorkyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, O.M. Melnik, Post-graduate**

Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkov

### **MODELING OF THE HOT PRESSING OF $ZrO_2$ POWDER**

*The algorithm of the simulation of hot pressing  $ZrO_2$ , which based on an Ashby model for the HIP was considered. And maps of hot pressing  $ZrO_2$  powders designed and allow us to find the pressure and temperature of the process HP to obtain the relative density  $\rho = 1,0$  at different times.*

**Keywords:** zirconium dioxide, nanopowders, hot-pressing.