

УДК 621.762.53

Брагина Я. Ю.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКА $ZrO_2$ С ЭЛЕКТРОНАГРЕВОМ

С развитием производства наблюдается увеличение спроса на изделия из керамических материалов, основными недостатками которых являются хрупкость и сложность обработки. Поэтому при деформировании керамических порошковых материалов все чаще используют технологию горячего прессования с применением высокоскоростного нагрева пропусканьем электрического тока непосредственно через деформируемую заготовку и/или через контактирующий с ней инструмент [1]. Исследуемая технология позволяет сократить, продолжительность обработки, минимизировать рост зерна, получить, новые металлические, керамические и интерметаллические материалы с уникальными свойствами и существенно улучшить механические и физические свойства известных материалов. Существенным недостатком нагрева пульсирующим электрическим током является неоднородность распределения температуры и сложность ее контроля внутри порошковой заготовки. Неоднородность температурного поля является причиной неравномерного уплотнения порошка и неоднородности свойств, что в ряде случаев не позволяет получить качественные изделия. Для учета и оптимизации всех перечисленных факторов целесообразно прибегнуть к моделированию данного процесса.

Значительный прогресс в моделировании горячего прессования порошковых материалов с нагревом электрическим током был сделан в работе [2], где рассматривалось горячее прессование четырех образцов с идеализированным распределением начальной плотности и с идеализированными свойствами. Для моделирования использовался программный комплекс ABAQUS, в основе которого лежит метод конечных элементов. Недостатком проведенного моделирования является то, что не учитывалось влияние инструмента на распределение температуры, а напряжение прикладывалось непосредственно к торцам заготовки. Принималось, что уплотнение заготовки происходит по механизму свободного спекания, и полностью игнорировалось влияние давления на уплотнение при прессовании. Также не принималось во внимание уплотнение порошка по механизму пластичности и ползучести. Не учитывалось влияние трения между порошком и инструментом на распределение плотности. Таким образом, необходимо дальнейшее совершенствование моделирования рассматриваемого процесса.

Целью предложенной статьи является исследование влияния давления прессования на процесс горячего прессования порошкового материала с нагревом электрическим током.

В представленной работе исследовалось два случая деформации порошка диоксида циркония  $ZrO_2$ , который является изолятором. В первом случае прессование порошка осуществлялось с давлением 5 МПа, а во втором – 60 МПа. В обоих случаях порошок засыпали в матрицу с внутренним диаметром 40 мм, на высоту засыпки порошка 14,4 мм и 14,2 мм для первого и второго случая, соответственно.

Режим нагрева порошка был принят на основе реальных экспериментов (рис. 1). Порошок нагревался со скоростью примерно 220 °С в минуту до температуры 1450 °С и затем выдерживался при этой температуре в течение 5 минут. Для регистрации температуры использовался пирометр, сфокусированный на дно отверстия в верхнем пуансоне на расстоянии 3 мм от поверхности образца. Данные пирометра использовались для отработки заданного цикла нагрева. На рисунке также представлены графики зависимости перемещения пуансона и изменение относительной плотности от времени протекания процесса.

Из графиков видно, что при давлении прессования 60 МПа порошковый материал уплотняется быстрее и при меньших температурных значениях. Уже при 1000 °С плотность близка к 1, конечная высота детали 4,96 мм. В случае прессования при давлении 5 МПа конечная высота равна 5,4 мм.

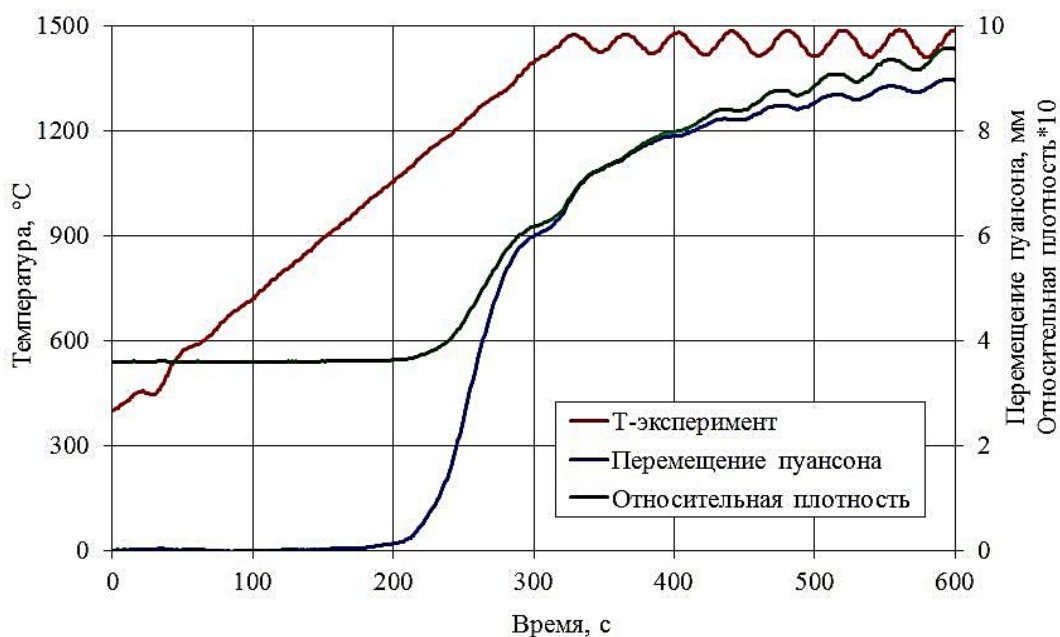
Относительная плотность материала была рассчитана по следующей формуле:

$$\rho_{\text{отн}} = \frac{\rho \cdot h_k}{h_k + (s_k - s_{\text{ш}})}, \quad (1)$$

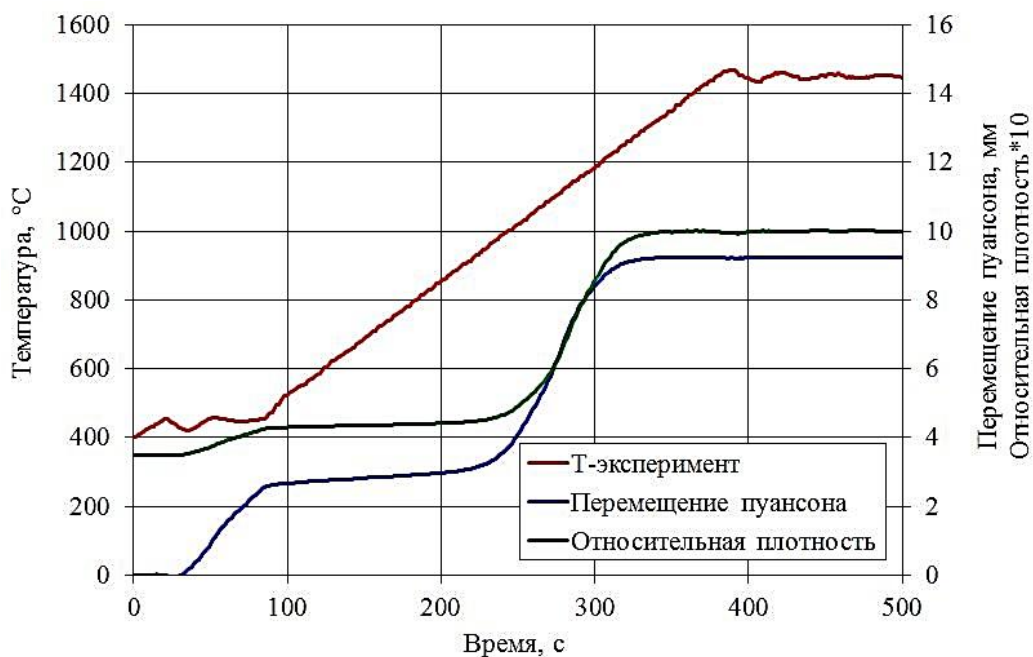
где  $\rho$  – плотность образца;

$h_k$  – конечная высота образца;

$s_k$  и  $s_{\text{ш}}$  – конечное перемещение пуансона и на определенном шаге, соответственно.



а



б

Рис. 1. График зависимости перемещения пуансона, относительной плотности порошка диоксида циркония, цикл нагрева:

а – при давлении прессования 5 МПа; б – при давлении прессования 60 МПа

На рис. 2 представлена схема оснастки (рис. 2, а), а также конечно-элементная модель системы инструмент-порошок, используемая при моделировании, с указанием траектории течения тока при прессовании порошка диоксида циркония (рис. 2, б). Как и ожидалось, в случае прессования порошка из диоксида циркония ток течет через пуансон к матрице и нагревает ее [3]. Нагрев порошка осуществляется путем передачи тепла от пуансона и матрицы.

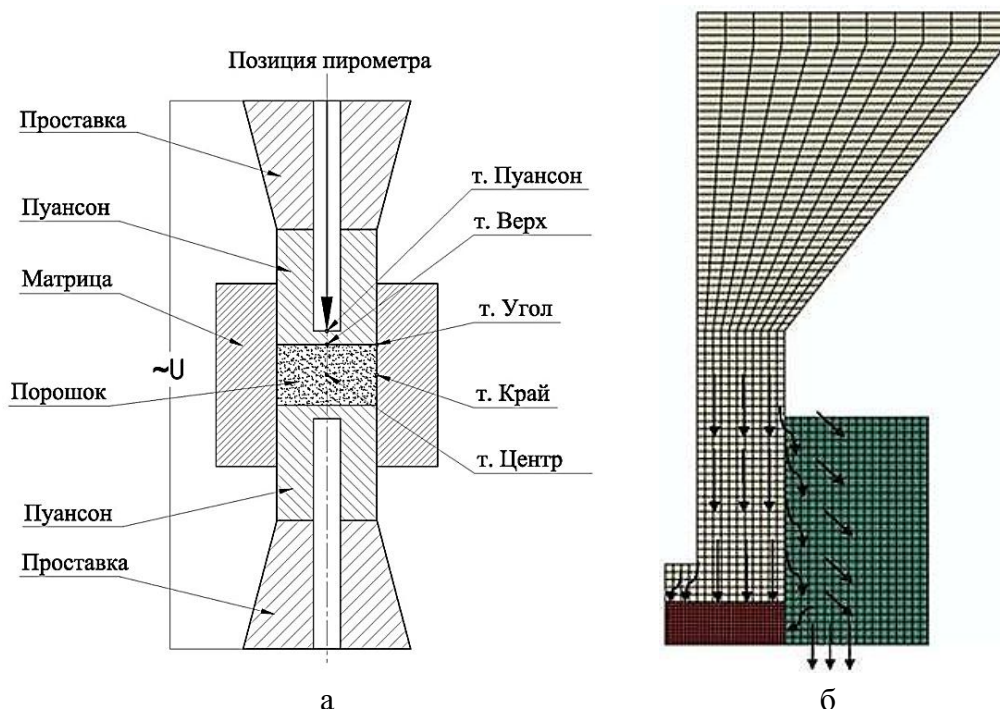


Рис. 2. Моделирование горячего прессования порошка диоксида циркония:

а – схема оснастки; б – конечно-элементная модель и направление течения тока при заданном процессе

Процесс моделирования горячего прессования осуществлялся пошагово. При этом производился расчет свойств материала на каждом шаге с учетом изменения его относительной плотности после прессования на 1 мм. В процессе моделирования были рассчитаны плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность и электропроводность с учетом изменения относительной плотности на каждом шаге. При этом электропроводность и удельная теплоемкость увеличивались с увеличением относительной плотности и температуры нагрева порошка диоксида циркония. Теплопроводность увеличивалась с увеличением относительной плотности, но уменьшалась при росте температуры нагрева. Плотность материала увеличивалась с увеличением относительной его плотности. Начальные свойства материала были взяты из работ [4–6].

В процессе моделирования исследовалась неравномерность температурного поля. Для этого рассматривались изменение температуры в пяти характерных точках. Точка, отмеченная на рис. 2, а как «Пуансон», является точкой, в которой температура регистрируется с помощью пирометра. Точка «Верх» соответствует верхней точке на оси образца. Точки «Край» и «Центр» соответствуют точкам на середине его боковой поверхности и центру образца, точка «Угол» соответствует точке соприкосновения порошка, матрицы и пуансона. В результате были построены графики зависимости температуры в характерных точках от времени нагрева образца при давлении прессования 5 МПа (рис. 3, а) и 60 МПа (рис. 3, б). Как следует из этих графиков, в обоих случаях наиболее нагретым элементом системы являются крайние точки «Угол» и «Край», что является следствием контакта с нагретыми поверхностями инструмента. Также видно, что во втором случае центр заготовки нагревается быстрее.

Для характеристики неоднородности температурного поля определялась разность температур  $\Delta T1 = \text{Край-Центр}$  и  $\Delta T2 = \text{Верх-Центр}$  (рис. 4). Как следует из графиков, представленных на рисунке, неоднородность температурного поля на стационарной стадии нагрева в случае для нагрева порошка и прессования его с давлением 5 МПа составила около 10 °С. Хотя до выхода на стационарную стадию разница температур достигала 400 °С, и только после нагрева порошка до 1000 °С она начинала уменьшаться. Во втором случае при давлении прессования 60 МПа неоднородность температурного поля в начальный период времени достигла 430 °С, хотя уже при нагреве до температуры 500 °С наблюдалось постоянное уменьшение разницы, которая была уже не более 50 °С. На стационарной стадии неоднородность температурного поля составила 10 °С. Также на рисунке представлены графики зависимости относительной плотности порошка от температуры нагрева. Из графиков видно, что при давлении прессования 60 МПа относительная плотность порошка начала увеличиваться уже при 450 °С, когда как при давлении 5 МПа только после нагрева заготовки до 1000 °С. Таким образом, при прессовании порошка диоксида циркония с давлением 60 МПа неоднородность температурного поля имеет более равномерный характер, который достигается за счет более быстрого уплотнения порошка, прослеживаемого на рис. 4.

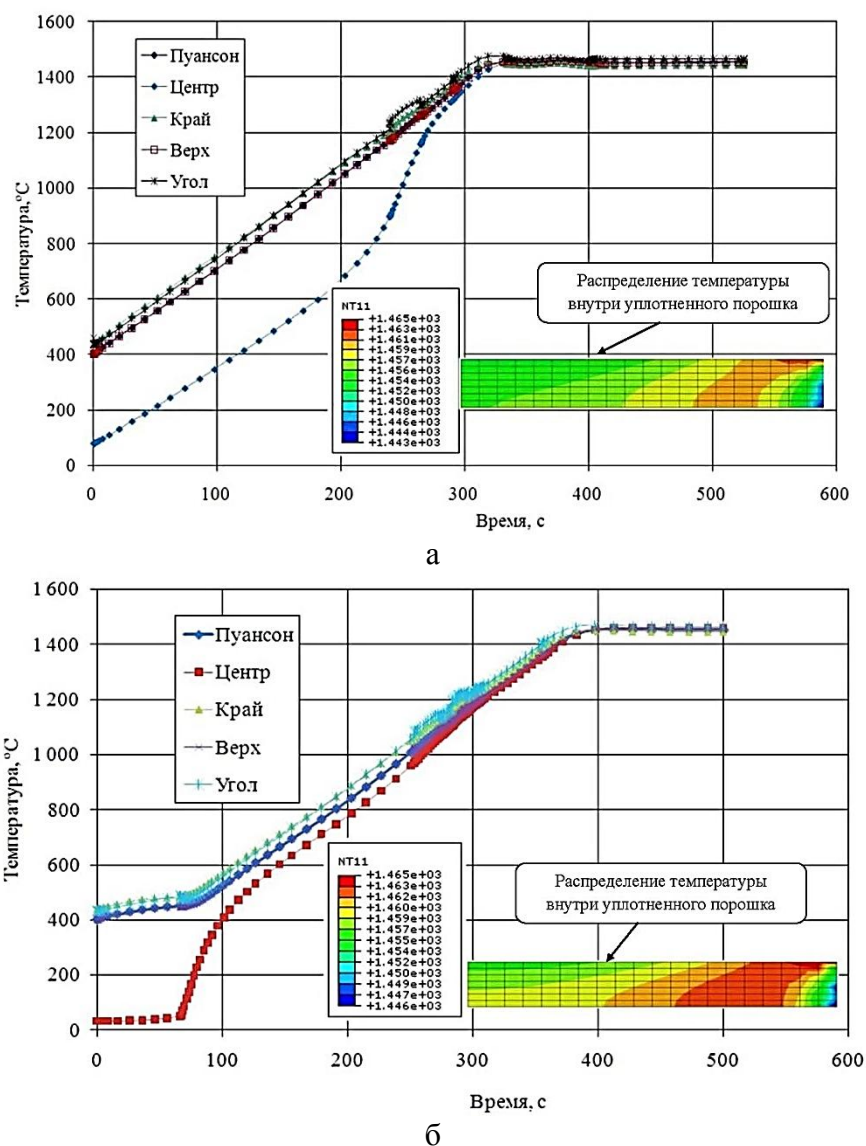


Рис. 3. Зависимости температуры в характерных точках от времени нагрева порошка из материала  $ZrO_2$ :

а – при давлении прессования 5 МПа; б – при давлении прессования 60 МПа

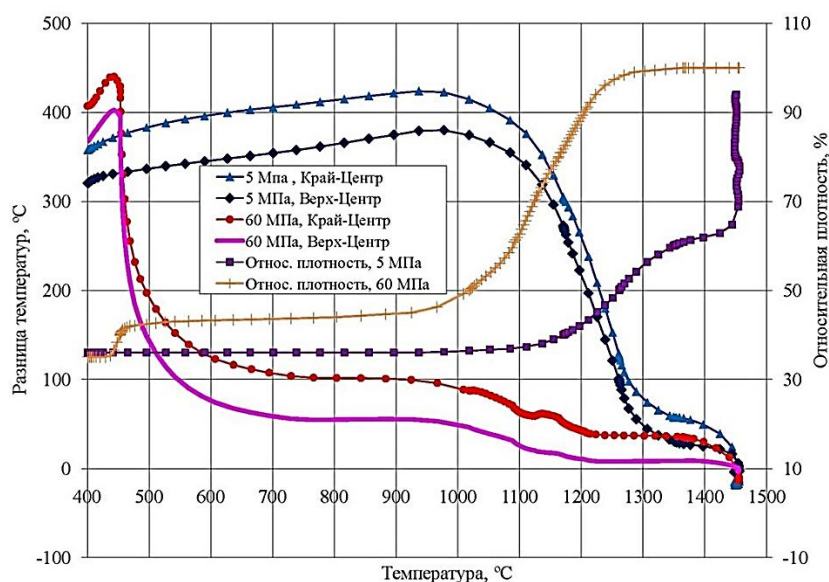


Рис. 4. Зависимость разности температур в характерных точках от температуры нагрева порошка диоксида циркония

### ВЫВОДЫ

Выполнено пошаговое моделирование порошка диоксида циркония, которое позволяет учесть изменение свойств материала в зависимости от уплотнения порошка, давления прессования и температуры нагрева при горячем прессовании с нагревом электрическим током. Установлено, что при прессовании порошка диоксида циркония с давлением 60 МПа неоднородность температурного поля имеет более равномерный характер, который достигается за счет более быстрого уплотнения порошка. При моделировании деформации порошковых материалов произведен учет изменения плотности материала, что является новым и значительным прорывом в моделировании данного процесса. Таким образом, разработанная в данной работе модель и программа являются незаменимым инструментом при освоении технологии горячего прессования порошков с нагревом пульсирующим электрическим током.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kessel H. U. *Sintered materials on the way to production by means of modern SPS technologies* / H. U. Kessel // *Beichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*. – 2009. – Vol. 86, N 10. – P. 145–152.
2. *Spark plasma sintering: A high strain rate low temperature forming tool for ceramics* / Jiang D., Hulbert D. M., Kuntz J. D., Anselmi-Tamburini U., Mukherjee A. K. // *Materials Science and Engineering A*. – 2007. – Vol. 463. – P. 89–93.
3. Ткаченко Я. Ю. *Моделирование распределения температуры при нагреве электрическим током образцов из ZrO<sub>2</sub> и ZrO<sub>2</sub>-TiCN для последующего сверхпластического деформирования* / Я. Ю. Ткаченко, А. М. Лантев // *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2011. – № 2 (27). – С. 30–33.*
4. Stevens R. *Zirconia and zirconia ceramics* / R. Stevens. – Manchester: Magnesium Electron Ltd., 1986. – P. 29–30.
5. *Thermal diffusivity and conductivity of Zr<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>O<sub>2-x/2</sub> (x = 0; 0.084 and 0.179) single crystals* / Mervrel R., Laizet J.-C., Azzopardi A., Leclercq B., Poulain M., Lavigne O. // *Journal of European Ceramic Society*. – 2004. – Vol. 24, N 10–11. – P. 3081–3089.
6. *Influence of impurities on the conductivity of composites in the system (3YSZ)<sub>1-x</sub>-(MgO)<sub>x</sub>* / Shiratori Y., Tietz F., Penkalla H.J., He J.Q., Shiratori Y., Stöver D. // *Journal of Power Sources*. – 2005. – Vol. 148. – P. 32–42.

Брагина Я. Ю. – ассистент каф. МТО ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: tkachenko1110@mail.ru