

Ткаченко Я.Ю., Лаптев А.М.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ
СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСТАНОВКАХ
С НАГРЕВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ**

Tkachenko I.Y., Laptev A.M.

**THE MODELING OF HOT PRESING OF SUPERHARD
MATERIALS IN EQUIPMENT WITH HEATING
BY ELECTRICAL CURRENT**

Представлены результаты моделирования процесс горячего прессования сверхтвердого порошкового материала диоксида циркония с нагревом электрическим током. При теоретическом анализе использован пошаговый способ моделирования процесса спекания с нагревом пульсирующим электрическим током. Учтены электрические, термические и механические свойства контактов между элементами оснастки, прессуемой заготовкой и окружающей средой. Получены зависимости распределения температуры, и характер уплотнения в образце в зависимости от времени и температуры нагрева.

Ключевые слова: порошок, горячее прессование, распределение температуры, нагрев электрическим током.

Введение

В последнее время широкое распространение получили твердые сплавы, которые относятся к труднообрабатываемым материалам. Для их обработки зачастую используют классические способы, которые требуют больших затрат времени и средств. Применение технологии горячего прессования с прямым нагревом электрическим током позволяет сократить продолжительность обработки, минимизировать рост зерна, получить, новые металлические, керамические и интерметаллические материалы с уникальными свойствами и существенно улучшить механические и физические свойства используемых материалов [1]. Подача электрического тока в процессе горячего прессования порошка с нагревом пульсирующим электрическим током осуществляется через специально разработанный источник электрического тока, который обеспечивает контроль формы, частоты и величины подачи импульсов тока. Ток проходит через инструмент и/или заготовку, обеспечивая быстрый нагрев порошкового материала. Однако существенным недостатком нагре-

ва электрическим током является неоднородность распределения температуры и сложность ее контроля внутри порошковой заготовки [2]. Неоднородность температурного поля является причиной неравномерного уплотнения порошка и неоднородности свойств, что в ряде случаев не позволяет получить качественные изделия. С целью учета и оптимизации перечисленных недостатков целесообразно прибегнуть к моделированию данного процесса.

В представленной работе исследовался диоксид циркония, который отличается высокой устойчивостью к разрушению по сравнению с другими керамическими материалами и стеклом, а также высокой прочностью, износостойкостью и устойчивостью к коррозии и низкой теплопроводностью. Наличие у диоксида циркония таких свойств как высокое термическое сопротивление и жаропрочность способствуют использованию его в качестве огнеупорного и строительного материала в машиностроении. Также диоксид циркония используется в медицине для изготовления зубных коронок, мостов, корневых штифтов и неметаллических имплантатов, наряду с производством имплантатов тазобедренного сустава. Таким образом, на сегодняшний день исследование свойств и возможностей обработки диоксида циркония является достаточно актуальным вопросом.

Цель

Целью работы является моделирование горячего прессования порошка диоксида циркония с нагревом прямым электрическим током с учетом изменения свойств материала в зависимости от изменения относительной его плотности.

Методика исследования

В представленной работе исследовалось горячее прессование с нагревом пульсирующим электрическим током порошка диоксида циркония ZrO_2 , который является изолятором. Порошок засыпали в матрицу с внутренним диаметром 40 мм, на высоту засыпки порошка 14,4 мм. Прессование порошка осуществлялось с давлением 5 МПа. Режим нагрева порошка был принят на основе реальных экспериментов. Нагрев порошка осуществлялся со скоростью примерно $220^{\circ}C$ в минуту до температуры $1450^{\circ}C$ 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. Показания пирометра использовались для обработки заданного цикла нагрева.

На рис. 1 представлена схема оснастки (рис. 1, а), а также конечно-элементная модель системы инструмент-порошок, используемая при

моделировании, с указанием траектории течения тока при прессовании порошка диоксида циркония (рис. 1, 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.

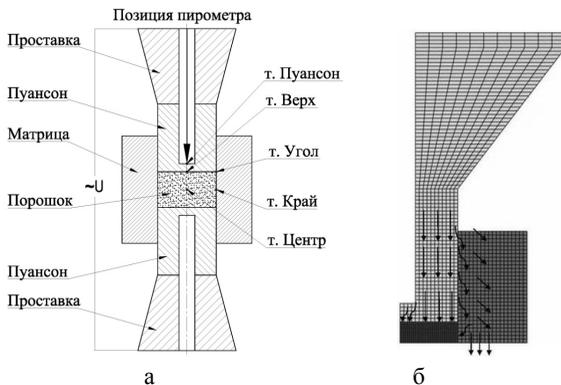


Рис. 1. Моделирование горячего прессования порошка ZrO_2 :
а - схема оснастки; б - конечноэлементная модель и направление течения тока

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 моделирования (табл. 1-3). Следовательно электропроводность и удельная теплоемкость увеличиваются с увеличением относительной плотности и температуры нагрева порошка диоксида циркония. Теплопроводность увеличивается с увеличением относительной плотности, но уменьшается при росте температуры нагрева. Плотность материала увеличивается с увеличением относительной его плотности. Начальные свойства материала были взяты из работ [4-6].

При моделировании исследовалась неравномерность температурного поля. Для этого рассматривались изменение температуры в пяти характерных точках. Точка, отмеченная на рис. 1, а как «Пуансон» является точкой, в которой температура регистрируется с помощью пирометра. Точка «Верх» соответствует верхней точке на оси образца.

Таблица 1

Удельная теплоемкость диоксида циркония в зависимости от температуры и относительной плотности

T, °C	Удельная теплоемкость, Дж/г·°C									
	RD=1	0,94	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,36	0,35
23	0,475	0,447	0,428	0,380	0,333	0,285	0,238	0,190	0,171	0,166
107	0,502	0,472	0,452	0,402	0,351	0,301	0,251	0,201	0,181	0,176
206	0,529	0,497	0,476	0,423	0,370	0,317	0,265	0,212	0,190	0,185
313	0,554	0,521	0,499	0,443	0,388	0,332	0,277	0,222	0,199	0,194
407	0,577	0,542	0,519	0,462	0,404	0,346	0,289	0,231	0,208	0,202
519	0,596	0,560	0,536	0,477	0,417	0,358	0,298	0,238	0,215	0,209
614	0,610	0,573	0,549	0,488	0,427	0,366	0,305	0,244	0,220	0,214
713	0,622	0,585	0,560	0,498	0,435	0,373	0,311	0,249	0,224	0,218
809	0,629	0,591	0,566	0,503	0,440	0,377	0,315	0,252	0,226	0,220
907	0,632	0,594	0,569	0,506	0,442	0,379	0,316	0,253	0,228	0,221
1004	0,632	0,594	0,569	0,506	0,442	0,379	0,316	0,253	0,228	0,221
1102	0,628	0,590	0,565	0,502	0,440	0,377	0,314	0,251	0,226	0,220

где RD – относительная плотность материала; T – температура нагрева, °C.

Точки «Край» и «Центр» соответствуют точкам на середине его боковой поверхности и центру образца, точка «Угол» соответствует точке соприкосновения порошка, матрицы и пуансона.

Результаты исследований

В результате были построены графики зависимости температуры в характерных точках от времени нагрева образца при давлении прессования 5 МПа (рис. 2). Как следует из этих графиков, наиболее нагретым элементом системы являются крайние точки «Угол» и «Край», что является следствием контакта с нагретыми поверхностями инструмента. Для характеристики неоднородности температурного поля определялась разность температур $\Delta T_1 = \text{Край-Центр}$ и $\Delta T_2 = \text{Верх-Центр}$ (рис. 3).

Как следует из графиков (рис. 3), неоднородность температурного поля на стационарной стадии нагрева составила около 10°C. Хотя до выхода на стационарную стадию разница температур достигала 400°C, и только после нагрева порошка до 950°C она начинала уменьшаться. Также на рисунке представлены график зависимости относительной плотности порошка от температуры нагрева. Из графика видно, что после нагрева заготовки до 1000 °C относительная плотность порошка начала увеличиваться.

Таблица 2

Электрoпроводность диоксида циркония в зависимости от температуры и относительной плотности

T, °C	Электрoпроводность, См/мм										
	RD=1	0,94	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,36	0,35	0,345
25	1,799E-07	1,637E-07	1,529E-07	1,258E-07	9,855E-08	7,1120E-08	4,366E-08	1,578E-08	4,401E-09	1,496E-09	0,0
300	2,203E-07	2,005E-07	1,872E-07	1,540E-07	1,207E-07	8,719E-08	5,346E-08	1,932E-08	5,390E-09	1,831E-09	0,0
400	7,418E-06	6,750E-06	6,304E-06	5,186E-06	4,064E-06	2,936E-06	1,800E-06	6,505E-07	1,815E-07	6,167E-08	0,0
500	4,047E-05	3,682E-05	3,439E-05	2,829E-05	2,217E-05	1,602E-05	9,821E-06	3,549E-06	9,901E-07	3,36E-07	0,0
600	1,624E-04	1,478E-04	1,380E-04	1,135E-04	8,897E-05	6,428E-05	3,941E-05	1,424E-05	3,973E-06	1,350E-06	0,0
700	6,643E-04	6,046E-04	5,647E-04	4,646E-04	3,640E-04	2,630E-04	1,613E-04	5,827E-05	1,626E-05	5,52E-06	0,0
800	1,601E-03	1,457E-03	1,361E-03	1,119E-03	8,771E-04	6,337E-04	3,885E-04	1,404E-04	3,917E-05	1,331E-05	0,0
900	2,688E-03	2,446E-03	2,284E-03	1,879E-03	1,473E-03	1,064E-03	6,523E-04	2,357E-04	6,576E-05	2,233E-05	0,0
1000	5,048E-03	4,593E-03	4,290E-03	3,529E-03	2,765E-03	1,998E-03	1,225E-03	4,427E-04	1,235E-04	4,197E-05	0,0
1250	1,949E-02	1,773E-02	1,656E-02	1,363E-02	1,068E-02	7,714E-03	4,730E-03	1,709E-03	4,768E-04	1,620E-04	0,0

Таблица 3

Теплопроводность диоксида циркония в зависимости от температуры и относительной плотности

T, °C	Теплопроводность, Вт/мм*°C										
	RD=1	0,94	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,36	0,35	0,345
23	0,003596	0,00327	0,00306	0,002514	0,001970	0,001423	0,000873	0,000315	0,000088	0,000030	0,0
107	0,003379	0,00307	0,00287	0,002362	0,001851	0,001337	0,000820	0,000296	0,000083	0,000028	0,0
206	0,003024	0,00275	0,00257	0,002114	0,001657	0,001197	0,000734	0,000265	0,000074	0,000025	0,0
313	0,003062	0,00279	0,00260	0,002141	0,001677	0,001212	0,000743	0,000269	0,000075	0,000025	0,0
407	0,003048	0,00277	0,00259	0,002131	0,001670	0,001206	0,000740	0,000267	0,000075	0,000025	0,0
519	0,003101	0,00282	0,00264	0,002168	0,001699	0,001227	0,000753	0,000272	0,000076	0,000026	0,0
614	0,003153	0,00287	0,00268	0,002204	0,001727	0,001248	0,000765	0,000276	0,000077	0,000026	0,0
713	0,003290	0,00299	0,00280	0,002300	0,001802	0,001302	0,000798	0,000288	0,000080	0,000027	0,0
809	0,003230	0,00294	0,00274	0,002258	0,001769	0,001278	0,000784	0,000283	0,000079	0,000027	0,0
907	0,003321	0,00302	0,00282	0,002322	0,001819	0,001314	0,000806	0,000291	0,000081	0,000028	0,0
1004	0,003327	0,00303	0,00283	0,002326	0,001823	0,001317	0,000807	0,000292	0,000081	0,000028	0,0
1102	0,003249	0,00296	0,00276	0,002271	0,001780	0,001286	0,000788	0,000285	0,000079	0,000027	0,0

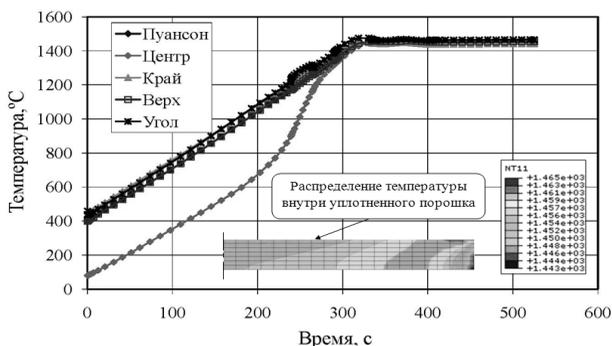


Рис. 2. Зависимости температуры в характерных точках от времени нагрева порошка ZrO_2

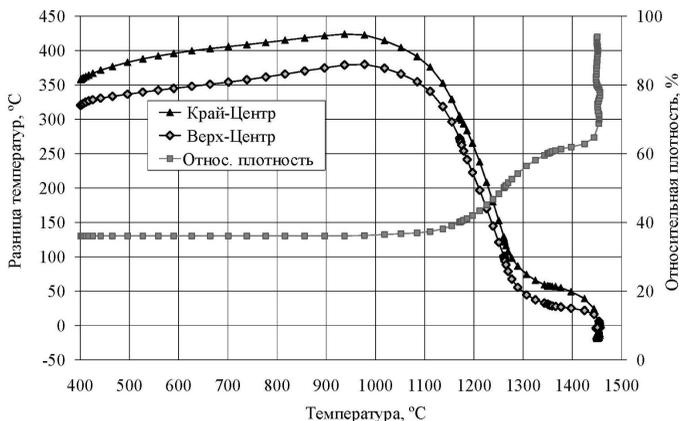


Рис. 3. Зависимость разности температур в характерных точках от температуры нагрева порошка диоксида циркония

Выводы

Таким образом, в данной работе выполнено пошаговое моделирование горячего прессования с нагревом электрическим током порошка диоксида циркония, которое позволяет учесть изменение свойств материала в зависимости от уплотнения порошка и температуры. Также учтены электрические, термические и механические свойства контактов между элементами оснастки, прессуемой заготовкой и окружающей средой. Установлено, что при деформации порошка с нагревом пульсирующим электрическим током возникают существенные градиенты температуры, как в осевом, так и в радиальном направлении, которые имеют схожий характер на протяжении всего процесса. Однако в осе-

вом направлении они ниже. Определено, что на величину температурных градиентов влияет цикл прессования, конструкция инструмента, свойства материала прессуемых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

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. Jiang D., Hulbert D. M., Kuntz J. D., Anselmi-Tamburini U., Mukherjee A. K. Spark plasma sintering: A high strain rate low temperature forming tool for ceramics / D. Jiang, D. M. Hulbert, J. D. Kuntz, U. Anselmi-Tamburini, A. K. Mukherjee // *Materials Science and Engineering A*. – 2007. – V.463. – P. 89–93.
3. Ткаченко Я. Ю. Моделирование распределения температуры при нагреве электрическим током образцов из ZrO_2 и ZrO_2 -TiCN для последующего сверхпластического деформирования / Я. Ю. Ткаченко, А. М. Лаптев // *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. Mervrel R., Laizet J-C., Azzopardi A., Leclercq B., Poulain M., Lavigne O. Thermal diffusivity and conductivity of $Zr_{1-x}Y_xO_{2-x/2}$ ($x = 0; 0.084$ and 0.179) single crystals / R. Mervrel, J-C. Laizet, A. Azzopardi, B. Leclercq, M. Poulain, O. Lavigne // *Journal of European Ceramic Society*. – 2004. – Vol. 24. – N 10–11. – P. 3081–3089.
6. Shiratori Y., Tietz F., Penkalla H.J., He J.Q., Stöver D. Influence of impurities on the conductivity of composites in the system $(3YSZ)_{1-x}(MgO)_x$ / Y. Shiratori, F. Tietz, H.J. Penkalla, J.Q. He, D. Stöver // *Journal of Power Sources*. – 2005. – Vol. 148. – P. 32–42.

REFERENCES

1. Kessel H.U. Sintered materials on the way to production by means of modern SPS technologies. – *Beichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, 2009, vol. 86, N 10, pp.145-152.
2. Jiang D., Hulbert D. M., Kuntz J. D., Anselmi-Tamburini U., Mukherjee A. K. Spark plasma sintering: A high strain rate low temperature forming tool for ceramics. *Materials Science and Engineering A*, 2007, v.463, pp. 89–93.
3. Tkachenko I. Y., Laptev A. M. The modelling of temperature distribution at heating by electrical current of samples from ZrO_2 and ZrO_2 -TiCN for further superplastic deformation. – *Materials working by pressure*, 2011, №2 (27), pp. 30–33.
4. Stevens R. Zirconia and zirconia ceramics. – Manchester: Magnesium Electron Ltd., 1986. pp. 29–30
5. Mervrel R., Laizet J-C., Azzopardi A., Leclercq B., Poulain M., Lavigne O. Thermal diffusivity and conductivity of $Zr_{1-x}Y_xO_{2-x/2}$ ($x = 0; 0.084$ and 0.179) single crystals. – *Journal of European Ceramic Society*, 2004; vol. 24, N 10–11, pp. 3081–3089.

6. Shiratori Y., Tietz F., Penkalla H.J., He J.Q., Shiratori Y., Stöver D. Influence of impurities on the conductivity of composites in the system $(3\text{YSZ})_{1-x}-(\text{MgO})_x$. – Journal of Power Sources, 2005, vol. 148, pp. 32–42.

Ткаченко Я.Ю., Лаптев О.М. Моделивання гарячого пресування надтвердих матеріалів в установках з нагрівом електричним струмом.

Представлені результати моделювання процесу гарячого пресування надтвердого порошкового матеріалу діоксид цирконія з нагріванням електричним струмом. При теоретичному аналізі використаний покроковий спосіб моделювання процесу спікання з нагрівом пульсуючим електричним струмом. Враховано електричні, термічні і механічні властивості контактів між елементами оснащення, пресованої заготовки і навколишнім середовищем. Отримано залежності розподілу температури, і характер уцілювання в зразку в залежності від часу і температури нагріву.

Ключові слова: порошок, гаряче пресування, розподіл температур, нагрів електричним струмом.

Tkachenko I.Y., Laptev A.M. The modeling of superhard materials in equipment with heating by electrical current.

The purpose of this paper is modelling of hot pressing of zirconia powder at heating by electrical current with taking into account changes in material properties depending on its relative density change.

The simulation of heating of powder from nonconductive ceramic Zirconium – ZrO_2 through the software package ABAQUS 6.9 has carried out. The mode of heating samples was taken from real experiments. The influence of heating schemes on uneven temperature field was analyzed during the simulation. The change in temperature in the characteristic points for this purpose was considered.

Completed step simulation of zirconium powder to take account of changes in material properties depending on the heating temperature at hot pressing with heating by pulsing electrical current. A fairly uniform temperature field is observed in the heating simulation of the powder from non-conductive materials by pulsing electric current.

The deformation of powder materials produced record changes of the material density that is new and significant breakthrough in the modeling of the process.

Keywords: powder, hot pressing, temperature distribution, heating by electrical current.

Ткаченко Я.Ю. – асистент каф. МТО Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск, Украина.
e-mail: tkachenko1110@mail.ru

Лаптев А.М. – д-р техн. наук, профессор Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск, Украина.
e-mail: laptev@dgma.donetsk.ua