

УДК 621.762.53

Ткаченко Я. Ю.
Лаптев А. М.**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НАГРЕВЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ ОБРАЗЦОВ ИЗ ZrO_2 И ZrO_2-TiCN
ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Создание принципиально новых прогрессивных технологий возможно лишь на основе использования открытий фундаментального характера. Одним из примеров является открытие эффекта сверхпластичности для керамических материалов. Керамические материалы используются во многих областях техники, и объем их применения непрерывно расширяется. Однако принципиальным недостатком керамических материалов является их хрупкость и сложность обработки. Штамповка в режиме сверхпластичности открывает новые перспективы получения керамических изделий сложной формы [1].

Необходимым условием сверхпластического деформирования керамических материалов является наличие мелкозернистой структуры (зерна менее 1 мкм), и ее сохранение при горячей деформации [2]. Для поддержания эффекта сверхпластичности необходимо подавлять процесс рекристаллизации и роста зерен [3]. Обеспечить данное условие возможно посредством быстрого нагрева заготовок и, по возможности, их быстрой деформации. В последнее время разработана технология и оборудование для высокоскоростного нагрева пропусканьем электрического тока непосредственно через деформируемую заготовку и/или через контактирующий с ней инструмент. Одновременно с нагревом к заготовке прикладывается усилие, и осуществляется процесс ее деформации [4, 5]. Необходимо отметить, что недостатком высокоскоростного нагрева является возникновение неоднородности температурного поля, которая может повлиять на качество получаемого изделия, существенно затруднить или даже исключить возможность деформации керамических заготовок в режиме сверхпластичности. Характер распределения температуры зависит от электрических и теплофизических свойств деформируемого материала и материала оснастки, контактных электрических и термических сопротивлений, конструктивных особенностей оснастки и применяемой установки горячего прессования, режимов обработки. Для предсказания температурного поля и поиска путей его оптимизации при разработке технологий деформирования в состоянии сверхпластичности целесообразно применять математическое моделирование. Вследствие многофакторности задачи единственно возможным методом для этих целей является метод конечных элементов [6].

Целью данной статьи является исследование влияния проводимости материала заготовки на характер температурного поля при нагреве прямым пропусканьем электрического тока перед последующей сверхпластической деформацией. В данной работе проводилось моделирование нагрева цилиндрических образцов диаметром 12 мм и высотой 24 мм из проводящего ток керамического композита $60ZrO_2-40TiCN$ и не проводящего ток диоксида циркония – ZrO_2 . Для моделирования применялся программный комплекс ABAQUS 6.9. Режим нагрева образцов был принят на основе реальных экспериментов. Образцы без диска нагревались со скоростью примерно 120 °С в минуту до температуры 1450 °С, а образцы с диском до – 1550 °С и затем выдерживались при достигнутой температуре в течение 12 минут. Для регистрации температуры использовался пирометр, сфокусированный на дно отверстия в верхнем пуансоне, т. е. на расстоянии 3 мм от поверхности образца. Записанные в файл показания пирометра использовались для задания цикла нагрева при моделировании.

Конструкция использованной в экспериментах и при моделировании оснастки схематически представлена на рис. 1. В процессе моделирования использовались две схемы деформирования заготовок: без промежуточных дисков (рис. 1, а) и с промежуточными дисками из SiC (рис. 1, б). В первом случае между образцом и токопроводящим графитовым пуансоном находилась только графитовая бумага, которая улучшает качество контакта. Учитывая,

что композит ZrO_2-TiCN с объемным содержанием компонентов 60/40 является проводником, в этом случае ток проходил как через графитовую оснастку, так и непосредственно через образец. При этом нагрев образца осуществлялся, в основном, за счет перехода электрической энергии в тепловую энергию в объеме самого образца (эффект Джоуля). При использовании образца из ZrO_2 , ток проходил только через графитовую оснастку, так как диоксид циркония является изолятором. При этом образец нагревался за счет теплопередачи от пуансонов. Во втором случае для нагрева заготовки из ZrO_2-TiCN между пуансоном и образцом дополнительно помещали два диска диаметром 20 мм и высотой 3 мм из карбида кремния, который является изолятором. При этом характер течения тока становился аналогичным течению, наблюдаемому при использовании заготовки из диоксида циркония. Методика моделирования была аналогичной методике использованной для определения поля температуры при прессовании порошков в матрице. Эта методика, а также сведения о свойствах материалов приведены в работах [5, 7].

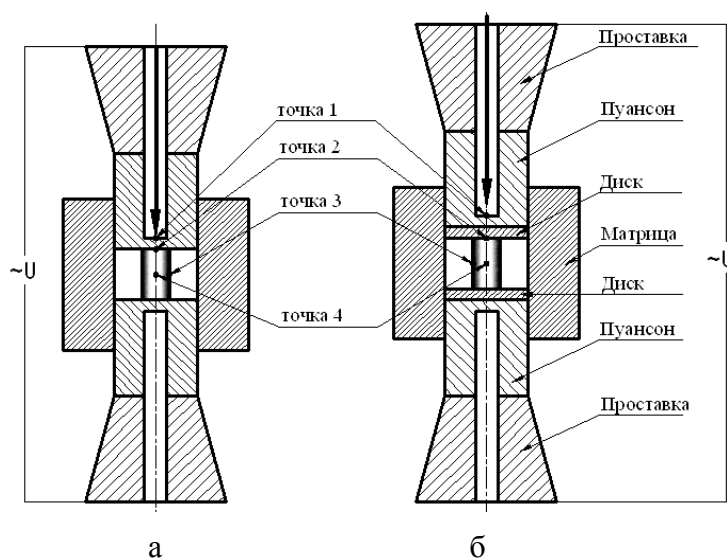


Рис. 1. Оснастка, используемая для сверхпластической деформации с прямым нагревом электрическим током:

а – без промежуточных дисков; б – с промежуточными дисками из SiC

Проведенное моделирование позволило проанализировать влияние проводимости материала заготовки на неравномерность температурного поля. Для этого рассматривалось изменение температуры в четырех характерных точках. Точка 1 на рис. 1 является точкой, в которой температура регистрируется с помощью пирометра. Температура в этой точке используется для задания цикла нагрева. Точка 2 соответствует верхней точке на оси образца. Точки 3 и 4 соответствуют середине боковой поверхности и центру образца. В результате моделирования были построены графические зависимости температуры в этих точках от времени нагрева образца, которые представлены на рис. 2. При нагреве образца из ZrO_2-TiCN без промежуточных дисков (рис. 2, а) максимальная температура после 170 с. нагрева достигается в его центральной точке 4, что объясняется нагревом образца при протекании через него электрического тока. Поверхность заготовки в данном случае имеет несколько меньшую температуру так как, взаимодействуя с окружающей средой, отдает ей часть тепла путем радиации. Минимальная температура наблюдается в точке контакта образца и пуансона, так как часть тепла расходуется на нагрев пуансона. В образце из ZrO_2 наблюдается обратная картина – максимальная температура наблюдается в точке контакта, а минимальная в центре образца (рис. 2, б). Это объясняется тем, что тепло передается от инструмента к образцу, как описано выше. Аналогичная картина наблюдается и при нагреве образца из $ZrO_2 - TiCN$ с промежуточными дисками из SiC (рис. 2, в). Таким образом, в процессе нагрева наибольший градиент во всех случаях наблюдался по высоте образца.

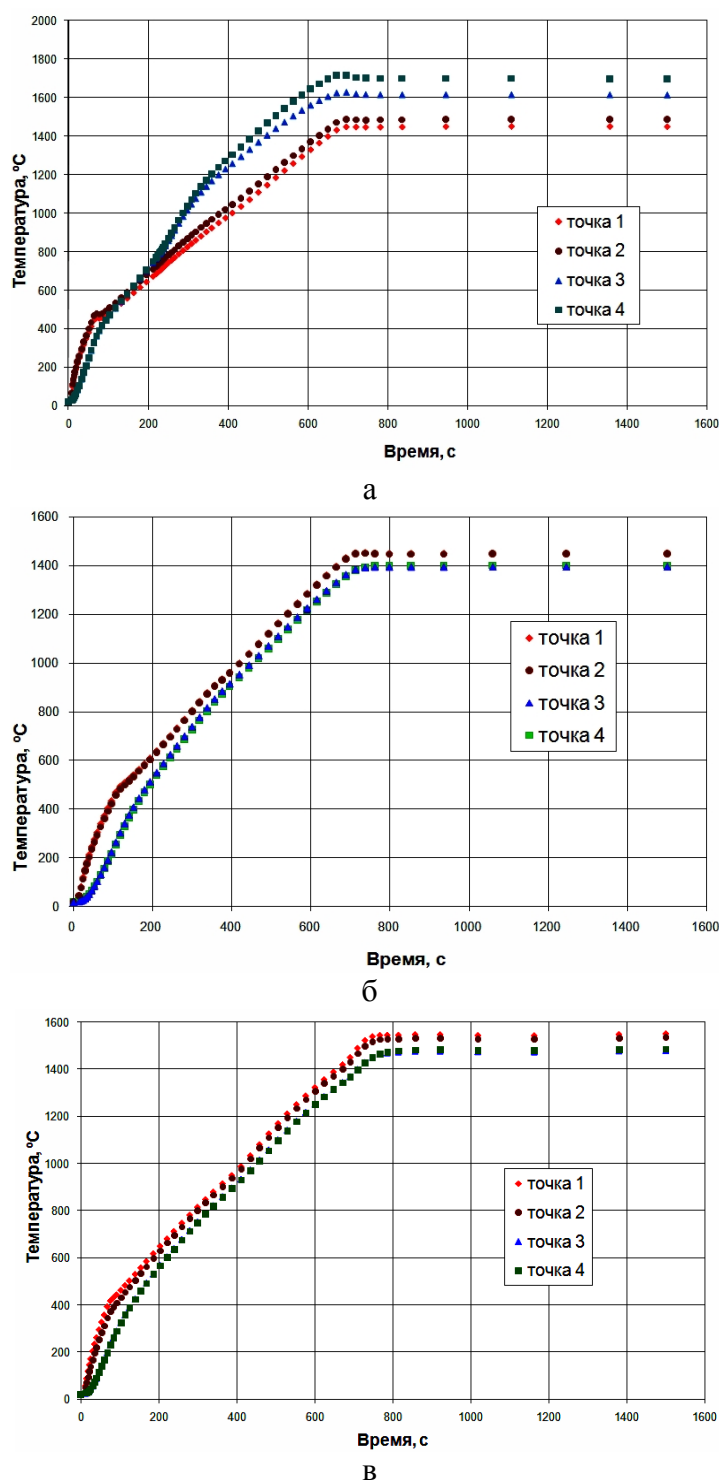


Рис. 2. Зависимости температуры в характерных точках от времени нагрева образцов из ZrO_2-TiCN и ZrO_2 без промежуточных дисков, (а) и (б) соответственно, и образца из ZrO_2-TiCN с промежуточными дисками (в)

Для характеристики неоднородности температурного поля вычислялась разность температур в двух точках образца (ΔT), в которых на стационарной стадии температура была наибольшей (T_{max}) и наименьшей (T_{min}). На рис. 3 показаны зависимости разницы температур ΔT от времени процесса. Для случая использования образца из ZrO_2-TiCN без промежуточного диска $\Delta T = T_4 - T_2$. Для ZrO_2 без промежуточного диска и ZrO_2-TiCN с промежуточным диском – $\Delta T = T_2 - T_4$. Отрицательное значение ΔT указывает на то, что в начале нагрева образец в его центральной части имеет более низкую температуру (T_4), чем в зоне контакта образца с пуансоном (T_2). При дальнейшем нагреве это соотношение температур

изменяется на противоположное. Неоднородность температурного поля на стационарной стадии нагрева проводящего композита без промежуточных дисков была выше 200 °С, в то время как в случае нагрева с изолирующими промежуточными дисками она лишь немного превышала 50 °С. Распределение температуры при нагреве образца из диоксида циркония без промежуточных дисков и композита с промежуточными дисками имеют схожий характер.

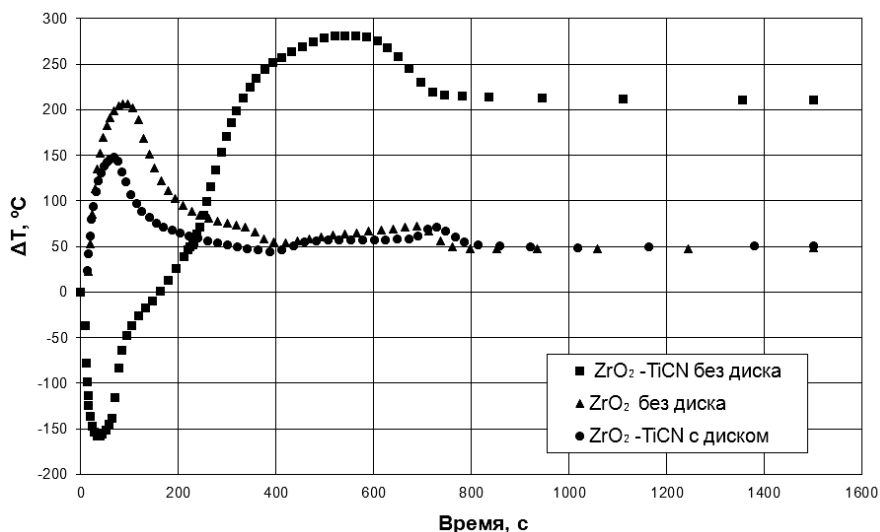


Рис. 3. Разность температур в характерных точках образцов

ВЫВОДЫ

При нагреве электрическим током образцов из керамических материалов для последующей сверхпластической деформации может возникать существенная неоднородность температурного поля. Для электропроводных материалов эта неоднородность значительно выше и может затруднить или даже исключить сверхпластическую деформацию керамического материала. Технологическим приемом, позволяющим уменьшить неравномерность температурного поля при нагреве заготовок из проводящего материала, является использование промежуточного диска из изолирующего материала, например карбида кремния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новые материалы / Колл. авторов; под науч. ред. Ю. С. Карабасова. – М. : МИСИС, 2002. – 736 с.
2. Lesuer D. R. Forming of superplastic ceramics / D. R. Lesuer // *Ceramics International*. – 1995. – V. 22. – P. 381–388.
3. Nieh T. G. Superplasticity in metals and ceramics / T. G. Nieh, J. Wadsworth, O. D. Sherby // *Cambridge University Press*. – 1997. – 255 p.
4. 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. – V. 463. – P. 89–93.
5. Modelling of the temperature distribution during field assisted sintering / Vanmeensel K., Laptev A., Hennicke J., Vleugels J., Van der Biest O. // *Acta Materialia*. – 2005. – V. 53. – P. 4379–4388.
6. Field assisted sintering of electro-conductive ZrO_2 -based composites / Vanmeensel K., Laptev A., Hennicke J., Vleugels J. // *Journal of European Ceramic Society*. – 2007. – V. 27. – P. 979–985.
7. The influence of percolation during Pulsed Electric Current Sintering of ZrO_2 -TiN powder compacts with varying TiN content / Vanmeensel K., Laptev A., Van der Biest O., Vleugels J. // *Acta Materialia*. – 2007. – V. 55. P. 1801–1811.

Ткаченко Я. Ю. – аспирант ДГМА;

Лаптев А. М. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МТиТОМ ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: tkachenko1110@mail.ru