

Абделмагид Абделрахман (Египет),  
Орлова Евгения Георгиевна (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Орлова Евгения Георгиевна, к.ф.-м.н., ассистент

## **ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТЯХ НАНОКОМПОЗИТНОЙ КАРБИДОКРЕМНИЕВОЙ КЕРАМИКИ**

Карбидокремниевая керамика – материал с сильной ковалентной связью, обладающий уникальными физико-химическими и механическими свойствами: хорошая теплопроводность, высокая прочность и твердость, низкая плотность [1]. Это объясняет интерес к исследованиям методов получения порошка SiC, объемного продукта, возможностей расширения области применения этого материала [2].

Известно [3], что получение объемного SiC из порошка является сложным процессом из-за сильной ковалентной связи, которая препятствует диффузии вакансий и приводит к очень медленной самодиффузии. Поэтому во время спекания происходит процесс укрупнения, а не уплотнения. Последнее же требует приложения высоких температур и давления [4]. Однако высокие температуры инициируют интенсивный рост зерна из-за более интенсивных процессов диффузии и миграции [5]. Рост зерна нежелателен из-за невозможности сохранения наноструктуры материала и уменьшения твердости и вязкости разрушения. Метод искрового плазменного спекания позволяет изготовить наноструктурированную керамику за счет одновременного приложения давления и импульсного тока.

В научной периодике опубликованы результаты исследований по влиянию условий получения карбидокремниевой керамики на её физические свойства, но крайне мало работ по определению влияния на свойства смачивания и взаимодействия жидкости с поверхностями SiC. Исследования свойств смачивания и процессов взаимодействия жидкости с поверхностями керамических композитных материалов актуально в связи с возможностью расширения областей их применения. Одним из направлений является установление возможности использования керамики в микрофлюидике, в качестве материала для создания мини-/микроканальных устройств. Однако нерешенной остается проблема управления гидродинамическими процессами на таких поверхностях. Не установлено влияние условий спекания, в частности, температуры, на свойства смачивания поверхностей керамики.

В настоящей работе решается группа задач по исследованию: 1) свойств смачивания поверхностей карбидокремниевой керамики, полученной в условиях спекания при температурах 1600 – 1800 °С; 2) динамических характеристик процесса движения малых объемов жидкости по поверхностям карбидокремниевой керамики.

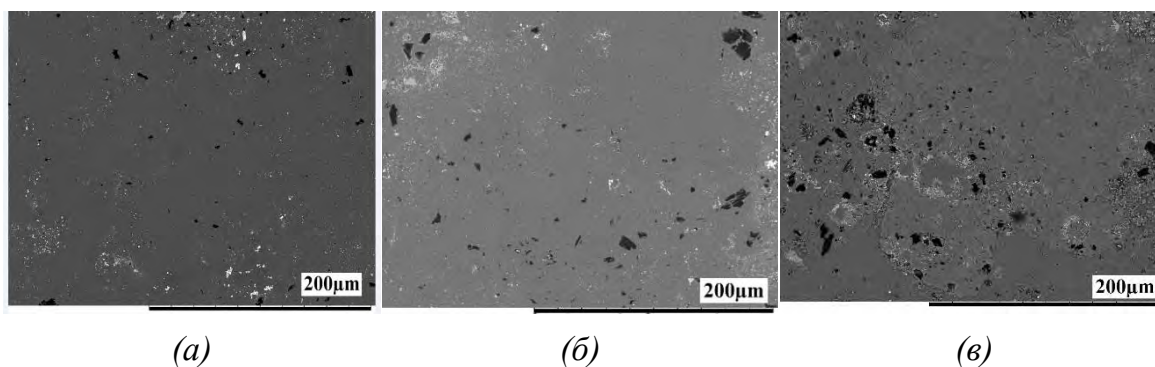
Керамические образцы изготовлены методом искрового плазменного спекания с использованием системы GT Advances Technologies SPS10-4 [6] из порошка, полученного плазмодинамическим синтезом [7], со средним размером зерна 70 нм. Характеристики образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

*Параметры спекания и характеристики образцов SiC*

| № образца | Параметры спекания |        | Плотность образцов            |                  | Параметры шероховатости образцов |         |
|-----------|--------------------|--------|-------------------------------|------------------|----------------------------------|---------|
|           | T, °C              | P, МПа | Абсолютная, г/см <sup>3</sup> | Относительная, % | Sa, мкм                          | Sz, мкм |
| 1         | 1800               | 120    | 3,050                         | 96,331           | 0,549                            | 41,5    |
| 2         | 1700               | 120    | 3,049                         | 96,303           | 0,558                            | 31,2    |
| 3         | 1600               | 120    | 2,771                         | 87,536           | 0,596                            | 23,4    |

Морфология полученных образцов исследована на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N. Параметры шероховатости получены на профилометрическом комплексе Micro Measure 3D station. Из рисунка 1 видно, что на поверхностях образцов хаотично расположены поры разных форм и размеров.



*Рис. 1. СЭМ изображения образцов карбидокремниевой керамики: (а) №1, (б) № 2, (в) № 3.*

Установлено, что трехмерный параметр шероховатости Sa (среднее арифметическое отклонения профиля) незначительно отличается друг от друга (табл. 1), поскольку все образцы после изготовления шлифовались и полировались в идентичных условиях. Экстремальная оценка

высот  $Sz$  характеризует разницу между максимальным значением выступов и максимальной глубиной углублений. Наименьшее значение  $Sz=23,4$  мкм зарегистрировано для образца №3, полученного при температуре  $1600^{\circ}\text{C}$ , наибольшее  $Sz=41,5$  мкм – при температуре  $1800^{\circ}\text{C}$  (№1).

Смачиваемость образцов оценивалась по величине статического контактного угла (СКУ). Последний получен теневым оптическим методом [8–10] при помещении капли дистиллированной воды объемом 10 мкл. Теневые изображения обрабатывались методами гониометрии. Погрешность составила не более 4,7 % [11].

Движение малых объемов жидкости реализовано системой, состоящей из высокоточного шприцевого насоса Cole Parmer EW-74905-04, трубки с наконечником. Процесс регистрировался теневым оптическим методом с использованием скоростной видеокамеры FastVideo 500M и системы генерации плоскопараллельного света. Объем капли равнялся 30 мкл, расход – 10 мкл/мин.

По результатам анализа свойств смачивания установлено, что условия спекания оказывают влияние на статический контактный угол. Зарегистрированы статические контактные углы на образце № 1 –  $46^{\circ}$ ; № 2 –  $60,7^{\circ}$ ; № 3 –  $74,9$ . Установлено, что с уменьшением температуры спекания, свойства смачивания образцов SiC ухудшаются, при этом плотность образцов уменьшается. Сформулирована гипотеза, что такое уменьшение статических контактных углов с ростом температуры спекания не связано с пористостью образцов SiC. Поскольку наилучшие свойства смачивания характерны для образца №1 с наименьшей пористостью. Также, при сопоставлении данных таблицы 1 и статических углов можно увидеть, что СКУ уменьшаются с ростом параметра  $Sz$ . Таким образом, выводы, сделанные на основе уравнения Венцеля, качественно согласуются с полученными результатами: с увеличением шероховатости происходит уменьшение статического контактного угла на гидрофильной поверхности.

На основе полученных зависимостей скорости перемещения линии трехфазного контакта (ЛТК) от времени проведен анализ механизмов растекания жидкости по поверхностям SiC (рис. 2). Из рисунка видно, что скорости перемещения ЛТК на образцах №1–3 отличаются друг от друга незначительно. Однако можно заметить, что наименьшая скорость зарегистрирована на образце №1 с наибольшим значением параметра  $Sz$ . То есть, выступы и впадины являются энергетическим барьером, препятствующим движению ЛТК.

Также стоит отметить характер изменения скорости перемещения ЛТК. Расход насоса постоянен во времени, однако скорость перемеще-

ния изменяется неравномерно, можно выделить четыре основных этапа. Первый, скорость резко снижается до некоторых значений ( $0,01-0,02 \cdot 10^{-3}$  м/с). Второй, на протяжении промежутка времени она изменяется незначительно (в пределах доверительного интервала), затем происходит ее резкое снижение до нуля. Третий, скорость не изменяется, т.е. в режиме откачивания жидкости контактная линия пиннингуется, а контактный угол и высота капли уменьшаются. Четвертый, на заключительной стадии режима откачки жидкости линия трехфазного контакта отцепляется от неровностей на поверхности (нарушается баланс сил, действующих на каплю) и она начинает отступать (отрицательная скорость на рис. 2).

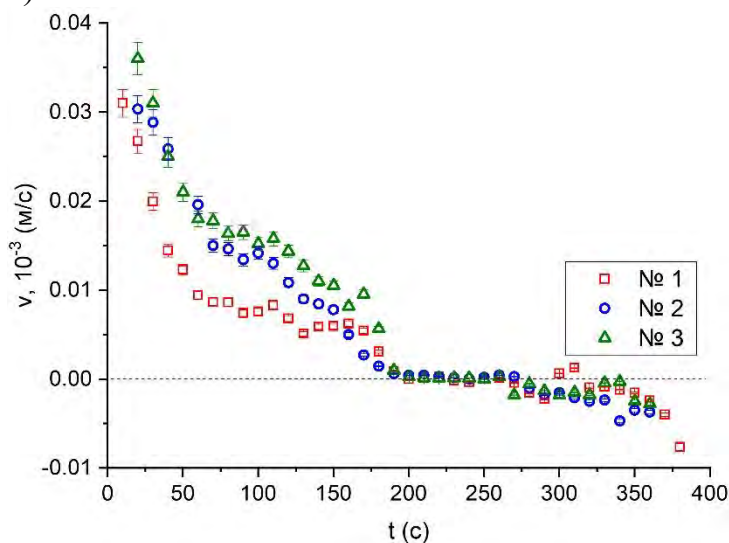


Рис. 2. Изменение скорости перемещения контактной линии на образцах SiC во времени.

По результатам проведенных исследований установлено влияние температуры спекания на свойства смачивания. Изучен механизм растекания жидкости по поверхностям нанокompозитной карбидокремниевой керамики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П., Семенов С.С. Керамика для машиностроения. – М.: Научтехлитиздат, 2003. – 384 с.
2. Насырбаев А.Р., Погорелова С.О., Никитин Д.С. Зависимость состава продукта плазмодинамического синтеза в системе si-c от давления среды камеры-реактора // Современные технологии и материалы новых поколений: сборник трудов международной конференции с элементами научной школы для молодежи. Томск, 09–13 октября 2017 г. – Томск, 2017 – С. 324–325.

3. Lane J.E., Carter C.H., Davis R.F. Kinetics and Mechanisms of High-Temperature Creep in Silicon Carbide: III, Sintered alpha-Silicon Carbide // Journal of American Ceramics Society. –1988. – Vol. 71. – P. 281–295.
4. Sivkov A., Gerasimov D., Evdokimov A., Rakhmatullin I., Nikitin D. Spark plasma sintering of ceramics based on silicon nitride and titanium nitride // IFOST-2016 : Proceedings of 11th International Forum on Strategic Technology. Novosibirsk, 01–03 June, 2016. – P. 173–177.
5. Biswas K. Solid state sintering of sic-ceramics // Materials Science Forum. – 2009. – Vol. 624. – P. 71–89.
6. Sivkov A., Nikitin D., Shanenkov I., Ivashutenko A., Rahmatullin I., Nassyrbayev A. Optimization of plasma dynamic synthesis of ultradispersed silicon carbide and obtaining SPS ceramics on its basis // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – Vol. 79. – P. 123–130.
7. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Никитин Д.С. Прямой динамический синтез нанодисперсных фаз оксидов титана при распылении электроразрядной плазмы титана в воздушную атмосферу // Письма в журнал технической физики. – 2016. – Т. 42., № 23. – С. 21–27.
8. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Зыков И.Ю., Батищева К.А. Влияние скорости образования капли при растекании по микроструктурированной поверхности на краевой угол // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – Т. 25., № 2 (110). – С. 247–254.
9. Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В., Кузнецов Г.В. Наносекундное лазерное излучение как способ текстурирования металлической поверхности для применения в системах капельного охлаждения // Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену : труды. Москва, 22–26 октября 2018 г. – Москва, 2018. – Т. 3. – С. 434–436.
10. Феоктистов Д. В., Орлова Е.Г. Смачивание поверхностей алюминий-магниевого сплава после обработки лазерным излучением // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2019. – № 3 (44). – С. 18–33.
11. Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V., Orlova E.G., Misyura S.Y., Morozov V.S., Islamova A.G. Evaporation modes of LiBr, CaCl<sub>2</sub>, LiCl, NaCl aqueous salt solution droplets on aluminum surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 126. – P. 161–168.