

9. **Park, Young-Jo.** Permeability enhancement in porous-sintered reaction-bonded silicon nitrides / *Young-Jo Park, Hai-Doo Kim, John W. Halloran* // Int. J. Appl. Ceram. Technol. — 2011. — Vol. 8, № 4. — P. 809–814.
10. **Park, Young-Jo.** The Characterization of porous sintered reaction-bonded silicon nitride ceramics fabricated by Si-Additive mixture granules / *Young-Jo Park, Boo-Won Park, Sae-Hoon Lee* [et al.] // Int. J. Appl. Ceram. Technol. — 2011. — Vol. 8, № 6. — P. 1501–1508.
11. **Гузман, И. Я.** Высокоогнеупорная пористая керамика / И. Я. Гузман. — М.: Металлургия, 1971. — 208 с.
12. **Анциферов, В. Н.** Особенности получения пористых нитридокремниевых материалов из тонкостенных элементов / В. Н. Анциферов, В. Г. Гилев // Порошковая металлургия. — 1991. — № 8. — С. 44–48.
13. **Анциферов, В. Н.** Особенности получения высокопористых материалов из нитрида кремния, оксинитрида кремния и силанов / В. Н. Анциферов, В. Г. Гилев, А. Г. Ланин [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 1996. — № 11. — С. 8–13.
14. **Анциферов, В. Н.** Прессование элементов из шликера для получения высокопористого РСНК / В. Н. Анциферов, В. Г. Гилев, А. А. Шацев // Огнеупоры. — 1992. — № 1. — С. 13–15.
15. **Анциферов, В. Н.** Технология изготовления высокопористого нитрида кремния / В. Н. Анциферов, В. Г. Гилев // Технология. Сер. Конструкции из композиционных материалов. — 1996. — № 2. — С. 9–16.
16. **Анциферов, В. Н.** Свойства пористых нитридокремниевых материалов / В. Н. Анциферов, В. Г. Гилев // Огнеупоры. — 1988. — № 7. — С. 20–23.
17. **Antsiferov V. N.** Thermal stress resistance of a porous silicon nitride / V. N. Antsiferov, V. G. Gilyov, A. G. Lanin [et al.] // Ceramics International. — 1991. — Vol. 17, № 9. — P. 181–185.
18. **Анциферов, В. Н.** Термостойкость пористых нитридокремниевых материалов из тонкостенных элементов / В. Н. Анциферов, В. Г. Гилев, А. Г. Ланин [и др.] // Порошковая металлургия. — 1992. — № 11. — С. 66–71.
19. **Анциферов, В. Н.** Влияние отжига в вакууме и среде азота на структуру и прочность пористых нитридокремниевых материалов / В. Н. Анциферов, В. Г. Гилев, А. Г. Ланин [и др.] // Огнеупоры. — 1993. — № 4. — С. 6–8.
20. **Анциферов, В. Н.** Прочность и разрушение высокопористой нитридокремниевой керамики / В. Н. Анциферов, В. Г. Гилев, А. Г. Ланин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. — 1993. — № 6. — С. 116–119.
21. **Анциферов, В. Н.** Свойства пористых нитридокремниевых материалов / В. Н. Анциферов, В. Г. Гилев // Огнеупоры. — 1988. — № 7. — С. 20–23.
22. **Добровольский, А. Г.** Шликерное литье / А. Г. Добровольский. — М.: Металлургия, 1977. — 240 с.
23. **Грибовский, П. О.** Керамические твердые схемы / П. О. Грибовский. — М.: Энергия, 1971. — 448 с. ■

Получено 15.12.14

© В. Н. Анциферов, В. Г. Гилев, 2015 г.

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), М. Р. Портной, к. т. н. **С. Ю. Федоров**, Н. Р. Портной
ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

УДК 621.924.93:666.3

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ КЕРАМИКИ ВОК71 В ВОДЕ

Приведены результаты экспериментального исследования процесса импульсного лазерного воздействия на поверхность оксидно-карбидной керамики при однокоординатной обработке в дистиллированной воде. Установлено, что технологическая среда оказывает существенное влияние на геометрические параметры единичного трека и морфологию новой поверхности. Полученные результаты позволяют осуществить выбор параметров лазерного воздействия с целью контролируемого микроструктурирования поверхности высокоплотной керамики.

Ключевые слова: высокоплотная керамика, импульсное лазерное излучение, трек, абляция, морфология поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее [1] была проанализирована связь технологических режимов импульсного лазерного воздействия, осуществляемого на воздухе, с морфологией поверхности оксидно-карбидной керамики ВОК71. Для эффективного применения лазерного метода модификации поверхностного слоя мате-

риала необходимо также знать механизм взаимодействия лазерного излучения с поверхностью материалов в разных технологических средах [2–4].

Цель выполненного экспериментального исследования — изучить особенности воздействия импульсного лазерного излучения на поверхность образцов из керамики ВОК71 в воде.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная методика подробно рассмотрена в работе [1], поэтому далее изложены толь-

✉
В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

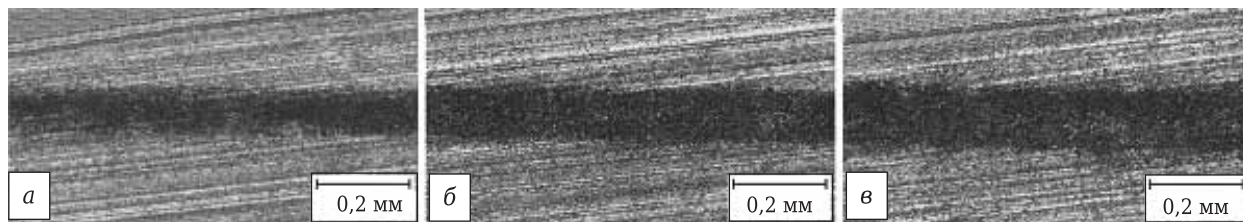


Рис. 1. Влияние мощности P лазерного импульса при $s_x = 10$ мкм на общий вид центральной части единичного трека, сформированного на поверхности керамики ВОК71 в воде. Мощность P , Вт: а — 5; б — 10; в — 15

ко ее базовые положения. Эксперименты выполняли для случая однокоординатной обработки треков длиной 4,5 мм с использованием технологического лазера модели U-15 (длина волны $\lambda = 1064$ нм, длительность импульса $\tau \approx 7$ нс, диаметр пятна фокусировки $d_f \approx 40$ мкм). Режимы импульсного лазерного воздействия изменяли в диапазонах: мощность P лазерного импульса 5–15 Вт, шаг s_x перемещения лазерного луча по оси x 10–50 мкм, частоту f следования импульсов от 10 до 100 кГц, число n импульсов в пачке 1–30, число проходов N в цикле обработки 1–25. Использовали образцы размерами $12,7 \times 12,7 \times 4$ мм из оксидно-карбидной керамики ВОК71 с шероховатостью исходной поверхности $Ra = 0,1$ мкм, которые помещали в емкость с дистиллированной водой. Толщина слоя воды над поверхностью образца в каждом эксперименте составляла 2 мм. Глубину h и ширину b единичного трека измеряли с использованием профилограф-профилометра «Hommel Tester T800». Морфологию сформированной поверхности керамики изучали на оптическом (Olympus BX51M) и растровом электронном (TESCAN VEGA 3LMN) микроскопах.

При изложении и анализе результатов, полученных в этом исследовании, их сравнивали с результатами, полученными в работе [1].

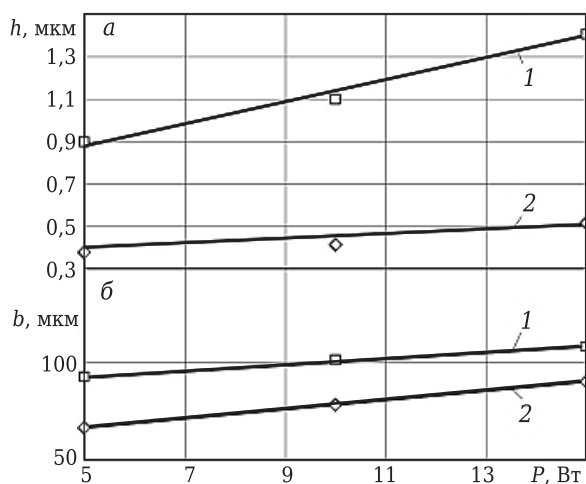


Рис. 2. Влияние мощности P лазерного импульса на средние значения глубины h (а) и ширины b (б) единичного трека, сформированного на поверхности керамики ВОК71 в воде при $f = 30$ кГц, $n = 1$ имп., $N = 1$ проход, $s_x = 10$ мкм (1) и $s_x = 40$ мкм (2)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты показали, что при импульсной лазерной обработке керамических образцов в воде с мощностью P лазерного импульса 5, 10 и 15 Вт образуются хорошо различимые единичные треки (рис. 1). Видно, что с возрастанием мощности лазерного импульса ширина трека увеличивается, причем даже при обработке с $P = 5$ Вт ширина трека значительно превышает диаметр пятна фокусировки лазерного луча. Треки, образовавшиеся в результате абляции поверхностного слоя керамики в воде, имеют нечеткие границы, что особенно заметно при обработке с $P = 5$ Вт. Морфология треков, сформированных в воде, по этому показателю существенно отличается от морфологии треков, созданных на воздухе, которые характеризуются достаточно четкими границами (особенно при обработке с перекрытием пятен от лазерного луча).

На рис. 2 показаны зависимости, характеризующие влияние мощности P лазерного импульса на геометрические параметры единичного трека, обработанного в воде при шаге $s_x = 10$ и 40 мкм, $f = 30$ кГц, $n = 1$ имп. и $N = 1$ проход. Видно, что рост P приводит к увеличению глубины h и ширины b трека, при реализации схемы обработки с перекрытием ($s_x = 10$ мкм) величины b и h значительно превышают аналогичные параметры трека, сформированного в результате обработки без перекрытия ($s_x = 40$ мкм).

При обработке с $s_x = 10$ мкм средние значения h составляют 0,9, 1,1 и 1,4 мкм для P 5, 10 и 15 Вт соответственно, что в 4 раза меньше по сравнению с глубиной треков, сформированных на воздухе при этих же режимах. Средние значения b в этом случае составляют 92, 103 и 110 мкм для $P = 5, 10$ и 15 Вт соответственно. Эти значения превышают в 1,6 и 1,28 раза средние значения ширины треков, созданных в результате лазерной импульсной обработки на воздухе с P 5 и 10 Вт соответственно. Средние значения b при обработке с $P = 15$ Вт в воде и на воздухе практически идентичны.

При обработке с $s_x = 40$ мкм средние значения h составляют 0,38, 0,42 и 0,53 мкм для P 5, 10 и 15 Вт соответственно, что в 5,5–5,7 раза меньше по сравнению с глубиной треков, сформированных на воздухе при аналогичных режимах. Средние значения b в этом случае составляют 66, 78 и 89 мкм для $P = 5, 10$ и 15 Вт соответственно. При обработке с $P = 5$ Вт среднее значение ширины

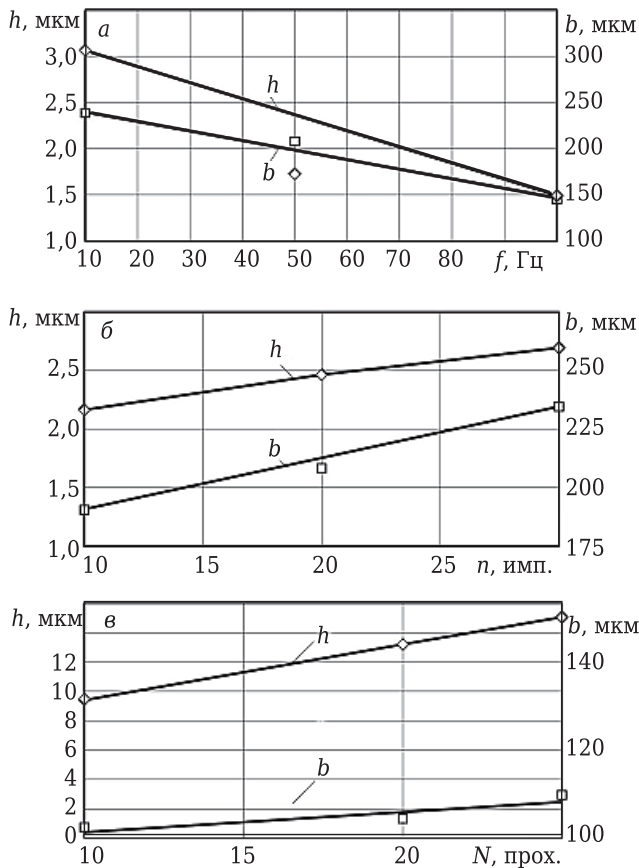


Рис. 3. Влияние частоты f следования лазерных импульсов (а), числа n импульсов в пачке (б) и числа циклов обработки N (в) на средние значения глубины h и ширины b единичного трека, сформированного на поверхности керамики ВОК71 в воде

трека, обработанного в воде, на 25 % превышает среднее значение b трека, обработанного на воздухе. При обработке с $P = 10$ Вт эти значения совпадают, с $P = 15$ Вт среднее значение ширины трека, обработанного в воде, меньше на 15 % среднего значения b трека, обработанного на воздухе.

Влияние шага перемещения лазерного луча на геометрические параметры единичного трека, сформированного в воде, более детально исследовали при обработке с $P = 12$ Вт, $f = 30$ кГц, $n = 1$ имп., $N = 1$ проход. Установлено, что увеличение s_x приводит к уменьшению глубины и ширины сфор-

мированных треков. Например, при обработке с $s_x = 10, 30$ и 50 мкм средние значения h составляют 1,6, 1,55 и 1,5 мкм, b 91, 85 и 81 мкм соответственно.

Зависимости среднего значения h и b единичного трека от частоты следования f лазерных импульсов, числа n импульсов в пачке и числа циклов обработки N показаны на рис. 3. Установлено, что увеличение f приводит к уменьшению h и b трека, обработанного при $P = 12$ Вт, $s_x = 10$ мкм, $n = 1$ имп. и $N = 1$ проход в воде (см. рис. 3, а). При этом средние значения h составляют 3, 1,9 и 1,5 мкм, средние значения b — 240, 200 и 150 мкм при f 10, 50 и 100 кГц соответственно. Сопоставление геометрических параметров треков, полученных в разных технологических средах, показывает, что при обработке в воде образуются треки, средние значения глубины которых в 10–17 раз меньше, а их ширина в 2,0–2,4 раза больше аналогичных параметров треков, сформированных на воздухе при этих же режимах.

Увеличение n также вызывает незначительное увеличение h и b трека, обработанного при $P = 12$ Вт, $s_x = 10$ мкм, $f = 30$ кГц и $N = 1$ проход (см. рис. 3, б). Средние значения h составляют 2,2, 2,5 и 2,7 мкм при n 10, 20 и 30 имп. в пачке соответственно, что в 7,3–9,7 раза меньше по сравнению со средней глубиной треков, сформированных на воздухе при этих же режимах. Одновременно зафиксировано увеличение в 2,0–2,25 раза ширины треков (b 190, 210 и 233 мкм при n 10, 20 и 30 имп. в пачке соответственно), сформированных в воде, по сравнению с шириной треков, созданных на воздухе при этих же режимах.

Увеличение N приводит к возрастанию h и b трека, обработанного при $P = 12$ Вт, $s_x = 10$ мкм, $f = 30$ кГц и $n = 1$ имп. (см. рис. 3, в). Средние значения h 9,5, 13,2 и 15 мкм при 10, 20 и 25 повторениях соответственно, что в 2,5–2,8 раза меньше по сравнению со средней глубиной треков, обработанных на воздухе при этих же режимах. Средние значения b 100, 105 и 110 мкм при 10, 20 и 25 повторениях соответственно, что на 20–25 % больше по сравнению со средней шириной треков, сформированных на воздухе при этих же режимах.

На рис. 4 представлены микрофотографии наиболее характерных морфологических рисун-

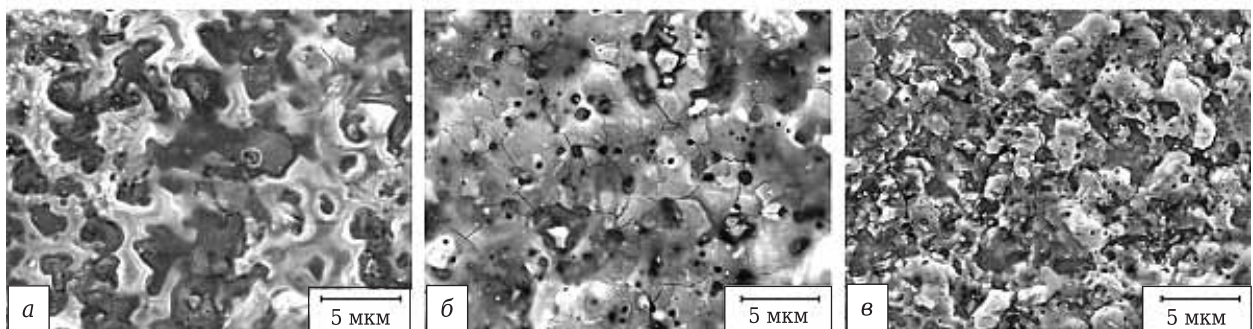


Рис. 4. Морфология дна треков, сформировавшихся в результате импульсного лазерного воздействия на поверхность керамики ВОК71 в воде

ков дна треков, сформировавшихся в результате импульсного лазерного воздействия на поверхность керамики ВОК71 в воде.

Установлено, что при малой интенсивности лазерного импульсного воздействия на поверхности керамики формируется непрерывная стекловидная структура с хорошо различимыми фазами оксида алюминия и карбида титана, которые плавно соединены между собой. Заметны также следы перемещения этих фаз относительно друг друга. На этой поверхности нет трещин и других признаков ее локального разрушения. Используемые режимы обработки позволяют до минимума свести процессы испарения материала и рассматривать механизм оплавления поверхности как движение жидкой фазы за счет сил поверхностного натяжения [5].

При обработке со средней и высокой интенсивностью лазерного импульсного воздействия на поверхности керамики формируется оплавленная структура без признаков присутствия разных фаз в поверхностном слое. Характерный признак этого морфологического рисунка — присутствие многочисленных кратеров разной формы и размеров. На поверхности обнаружены также четко выраженные «трещины-границы» между соседними областями поверхностного слоя керамики. Технологические режимы импульсной лазерной обработки оказывают наибольшее влияние на сглаженность рельефа поверхности, а также на число и размеры образующихся кратеров.

При обработке с большим числом импульсов в пачке (10 и более) формируется поверхность с чрезвычайно развитым рельефом. Поверхность характеризуется многочисленными оплавленными частицами размерами от 0,5 до 5 мкм, образованными на достаточно ровной и бездефект-

ной базовой поверхности керамики. На крупных оплавленных частицах имеются многочисленные мелкие кратеры (размером до 0,5 мкм). В некоторых областях этой поверхности обнаружены отдельные короткие трещины, происхождение которых можно связать с интенсивными термодинамическими нагрузками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных экспериментальных исследований при использовании воды установлено, что импульсное лазерное воздействие в воде сложным образом влияет на геометрические параметры единичного трека, а также морфологию образованной поверхности. Рост P , n и N приводит к увеличению глубины и ширины единичных треков, а повышение s_x и f — уменьшает эти геометрические параметры. При импульсной лазерной обработке в воде ширина образующихся треков превышает их аналогичный параметр при обработке на воздухе, а глубина треков, образованных в воде, меньше глубины треков, созданных на воздухе. При импульсном лазерном воздействии происходит микроструктурное модифицирование поверхностного слоя керамики, причем морфология его зависит от энергетической характеристики лазерного импульса. Целенаправленное изменение технологических режимов и среды обработки позволяет контролировать эти структурные изменения.

Данные прикладные научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России (Уникальный идентификатор проекта — RFMEFI57414X0003).

Библиографический список

1. Кузин, В. В. Воздействие импульсного лазерного излучения на поверхность керамики ВОК71 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 7. — С. 48–52.
2. Рыкалин, Н. Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев [и др.]. — М. : Мир, 1988. — 496 с.
3. Kuzin, V. Surface modification of zirconia (Y-TZP) ceramics induced by pulsed laser machining / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Fedorov [et al.] // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vol. 752/753. — P. 481–484.
4. Anoop, N. Samant. Three-dimensional laser machining of structural ceramics / Anoop, N. Samant, Narendra B. Dahotre // J. Manufacturing Processes. — 2010. — № 12. — P. 1–7.
5. Шкловский, В. А. К теории лазерного остекловывания с учетом кинетики фазового превращения / В. А. Шкловский, А. А. Моторная, К. В. Маслов // Поверхность. Физика, химия, механика. — 1983. — № 6. — С. 91–104. ■

Получено 29.06.15

© В. В. Кузин, М. Р. Портной,
С. Ю. Фёдоров, Н. Р. Портной, 2015 г.