

Д. т. н. В. В. Кузин (✉), д. т. н. С. Н. Григорьев, к. т. н. М. Ю. Фёдоров,
Е. А. Остриков

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет
«Станкин», Москва, Россия

УДК 621.771:666.3

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПРОРЕЗКИ ПОЛОСТЕЙ В КЕРАМИКЕ. Общая характеристика процесса

Исследован процесс импульсной лазерной прорезки полостей в образцах Al_2O_3 -TiC-керамики. Установлено, что прорезанные полости имеют внешнюю и внутреннюю области, размеры которых определяются параметрами режима импульсного лазерного воздействия. Выявлены морфологические особенности обработанных поверхностей.

Ключевые слова: импульсная лазерная обработка, полость, Al_2O_3 -TiC-керамика, морфология, наплыв, грат, трещина.

ВВЕДЕНИЕ

Современные лазерные технологии являются неотъемлемой частью производственной системы изготовления деталей из разных материалов [1, 2]. В отношении керамических материалов эти технологии эффективно дополняют традиционную алмазную обработку и создают многофункциональную технологическую оболочку для изготовления высокоточных деталей сложной формы [3–5]. Преимущества лазерного излучения как бесконтактного инструмента, создающего на локальном участке поверхности мощный тепловой поток, реализуются посредством разрушения керамики и удаления припуска без механического воздействия [6, 7].

При поверхностной обработке керамических заготовок роль основных физических эффектов (нагрев, расплавление и испарение) лазерного воздействия достаточно изучена [8–10]. Однако механизм разрушения керамики при лазерной прорезке глубоких полостей реализуется в специфических условиях: происходит расфокусирование лазерного луча, образуется объемный ионизированный факел и отсутствует эффективный отвод продуктов обработки [11]. Эти факторы значительно усложняют процесс прорезки глубоких полостей и делают его весьма нестабильным [12]. Видимым подтверждением стохастичности этого процесса является большое число новообразованных структур, которые являются дефектами лазерной обработки [13]. Эти дефекты, удаляют

на операциях, дополнительно вводимых в технологический процесс.

Недостаточная изученность физических явлений, сопровождающих импульсную лазерную обработку глубоких полостей и стохастическое образование дефектов, не позволяет сформировать научно обоснованный подход к изготовлению высокоточных керамических деталей. Для решения этой актуальной задачи в МГТУ «Станкин» изучены физические закономерности импульсной лазерной прорезки глубоких полостей в разных керамических материалах. На основе полученных результатов создан алгоритм проектирования технологических процессов изготовления высокоточных деталей. Результаты этого исследования будут изложены в серии статей.

В настоящей статье приведены базовые результаты исследования процесса импульсной лазерной прорезки полостей в образцах Al_2O_3 -TiC-керамики.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовали полости, прорезанные на исходной поверхности (рис. 1, а) образцов длиной 10, шириной 2 и высотой 2 мм с использованием импульсного лазера модели U-15. Прорезали сквозные полости (от одной торцевой поверхности образца до другой) на воздухе без продувки зоны обработки газом. Режимы обработки приведены ниже:

Мощность P , Вт..... 2,5–15,0
Шаг перемещения лазерного луча s , мкм..... 8–50
Число импульсов в пачке n 100–1000
Число проходов в цикле N 1–100

Частоту импульсов ($f = 10$ кГц), относительную скорость растрового сканирования $v = 100$ %, длительность импульса ($\tau \approx 7$ нс) и диаметр пятна



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

луча ($d_p \sim 40$ мкм) в экспериментах не изменяли. На каждом режиме прорезали по три полости. В экспериментах использовали образцы высокоплотной Al_2O_3 -TiC-керамики (предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ 650 МПа, трещиностойкость K_{Ic} 5,4 МПа·м^{1/2}, плотность ρ 4,3 г/см³ и твердость HRA 93). Структура этой керамики сформирована зернами неправильной формы размерами 2–5 мкм. Шероховатость поверхностей образцов составляла $Ra = 0,10 \div 0,15$ мкм.

После прорезки полостей изучали их профиль, морфологию боковых поверхностей полости, а также морфологию исходной и торцевой поверхностей образцов с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMN. Эти исследования провели на специально подготовленных образцах поперечного (рис. 1, б) и продольного изломов. Первоначально изготавливали образцы поперечного излома. Для этого на опорной поверхности керамического образца прорезали отрезным алмазным кругом канавку глубиной 0,25 мм по направлению А–А на заточном станке. Затем по этой канавке производили скол керамического образца путем однократного ударного нагружения. После изучения образцов поперечного излома из них изготавливали образцы продольного излома путем дополнительных сколов (однократное ударное нагружение) вдоль каждой прорезанной полости по линиям B_1-B_1 , B_2-B_2 , ..., B_i-B_i .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что в процессе образования полости в керамическом образце под действием пачки (серии) лазерных импульсов задействован комплекс взаимосвязанных физических эффектов. Эти эффекты протекают в условиях сверхвысоких температурных градиентов, сформировавшихся в локальных областях поверхностного слоя керамики под действием циклически повторяющихся высокоэнергетических импульсов. Импульсы лазерного луча, следующие в пачках по 100–1000 шт. и сфокусированные на исходную поверхность образца, поглощаются и нагревают керамику до температур плавления и кипения. Во время каждого лазерного импульса происходит выброс жидкой фазы и пара, изменяющий условия взаимодействия следующего лазерного импульса с керамикой. Результатом выноса расплава и пара является образование каверны, форма и размер которой определяются параметрами лазерного излучения.

После перемещения луча на следующую позицию с установленным шагом s процесс образования каверны повторяется. Однако в этом случае часть жидкой фазы стекает в ранее созданную каверну и уменьшает ее размер, прежде всего глубину. Совокупность соседних каверн образует полость, профиль которой

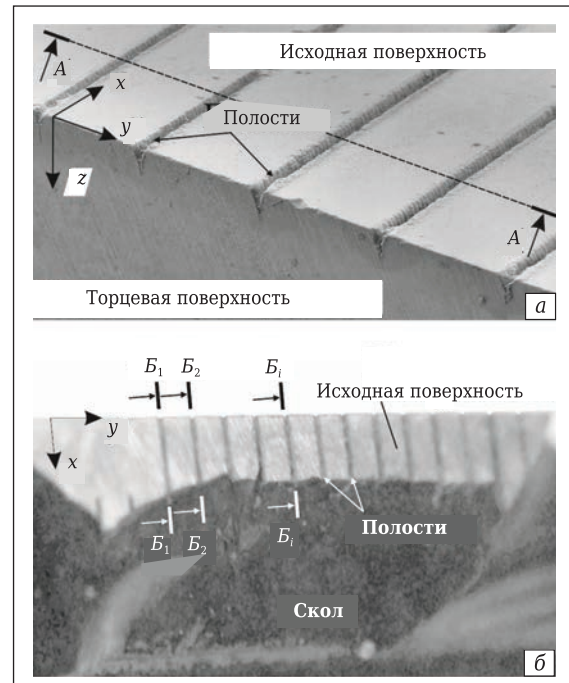


Рис. 1. Керамический образец Al_2O_3 -TiC-керамики с прорезанными полостями (а) и образец поперечного излома (б)

формируют внешняя (видимая) и внутренняя (невидимая) области, размеры которых определяются параметрами режима импульсной лазерной обработки.

Типичный профиль внешней области прорезанной полости в образце Al_2O_3 -TiC-керамики показан на рис. 2. Видно, что эта область имеет весьма нестабильный профиль и волнообразные боковые поверхности 1, созданные фрагментами каверн (см. рис. 2, а). На боковых поверхностях хорошо заметны гребни 2 и впадины 3, причем расстояние между соседними гребнями (впадинами) соответствует шагу перемещения лазерного луча s . Другая причина нестабильного профиля — присутствие затвердевшей жидкой фазы на боковых поверхностях. Глубина полости изменяется в широком диапазоне, а ее дно полностью покрыто отвердевшей жидкой фазой, в которой имеются воронки с центральным отверстием 5–10 мкм. Основными элементами морфологического рисунка боковой поверхности полости являются оплавленные шарообразные частицы 4 размерами до 5 мкм и сплавленные конгломераты зерен 5 размерами до 25 мкм. Дополняют морфологический рисунок этой поверхности многочисленные растекшиеся капли 6 материала и брызги 7 разной формы и размеров.

На исходной поверхности вокруг полости образуется наплыв 8, имеющий весьма хаотичную границу с исходной поверхностью. Основу наплыва составляет тонкая пленка расплавленной керамики со сглаженной морфологией поверхности. Большую площадь этой пленки покрыва-

ют грат 9, сформированный каплями и брызгами микронного размера, а также пылевидный слой 10, являющийся следствием конденсации пара на поверхности керамического образца. Также на этой поверхности обнаружены отдельные крупные капли и брызги 11. Толщина напыла на исходной поверхности керамического образца заметно увеличивается непосредственно у края полости за счет образования валика 12. Структуру этого образования формируют отвердевшие мелкие капли и брызги.

Более выраженная картина структурных новообразований вокруг видимой области прорезанной полости зафиксирована на торцевой поверхности образца. Здесь также имеются валик 12, наплыв 8, покрытый гратом 9 и пылевидным слоем 10, а также большое число крупных капель и брызг (см. рис. 2, б). Как правило, капли 11 имеют шаровидную форму, а брызги 12 — произвольно-хаотичную. Морфологический рисунок боковой поверхности образца является более развитым, чем исходной поверхности, главным образом из-за большего числа брызг и их большего разлета относительно видимой области прорезанной полости. Также на боковой поверхности полости и исходной поверхности

образуются крупные частицы 13 неправильной формы.

На рис. 3 показаны микрофотографии напылов на боковой поверхности прорезанной полости (см. рис. 3, а) и исходной поверхности образца (см. рис. 3, б) после действия пачки лазерных импульсов. Видно, что напылы имеют многослойную структуру и являются результатом многостадийного процесса их образования. Толщина напылов, а также структура и толщина их слоев зависят от режима импульсного лазерного воздействия, определяющего температуру керамики, расплава и брызг. На границе твердая керамика — наплыв образуется крупная трещина, по которой происходят сколы фрагментов напыла после окончания обработки из-за критических локальных остаточных напряжений, сформировавшихся в поверхностном слое керамики. Обнаружены также многочисленные трещины между слоями в напыле с аналогичной природой происхождения. Установлено, что образование напылов приводит к сглаживанию морфологии исходной керамики (см. рис. 3, а). Это свидетельствует о том, что растекание жидкой фазы сопровождается плавлением гребней поверхностных зерен,



Рис. 2. Общий вид видимой области прорезанной полости в образце $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ -керамики: а — вид сверху; б — вид сбоку

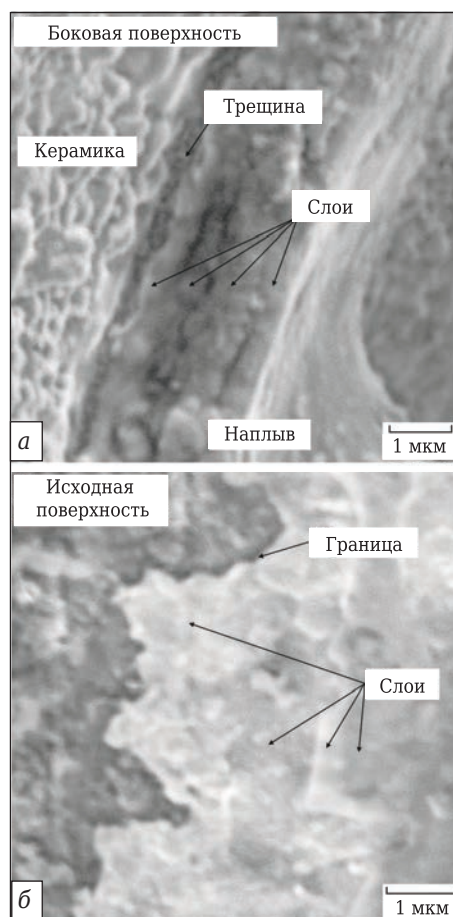


Рис. 3. Многослойная структура напыла в верхней части внутренней поверхности полости (а) и на исходной поверхности (б) образца $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ -керамики

формирующих исходную структуру керамики. Расфокусировка лазерного луча с увеличением глубины полости приводит к возрастанию объема жидкой фазы, остающейся на ее дне после окончания действия пачки импульсов.

Анализ морфологии поверхностей внешней области полости показывает, что жидкая фаза выплескивается и растекается по боковым поверхностям полости, по исходной и торцевым поверхностям керамического образца. При этом действует механизм перемещения частиц с верхней и боковой поверхностей капли на твердую керамику. Химический анализ состава наплывов показал значительное увеличение в ее составе кислорода.

Типичный профиль внутренней области прорезанной полости в образце $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ -керамики показан на рис. 4. Эта область визуальнo проявляется только на образцах поперечного и продольного изломов. На образце поперечного излома виден единичный канал от прохождения лазерного луча по объему керамики (см. рис. 4, а). Лазерный луч внедряется глубоко в керамику по сложной дискретной траектории, имеющей существенное отклонение от вертикальной линии. Образование прерывистых зон затвердевшей жидкой фазы и ее разрушенных фрагментов, окружающих этот канал, связано с многократным отражением лазерного импульса от стенок канала. Некоторое число этих контактов происходит с образованием жидкой фазы, а другая часть с разрушением слоев ранее образовавшихся наплывов.

На образце продольного скола (см. рис. 4, б) видна совокупность каналов от прохождения лазерного луча по объему керамики, имеющих достаточно стабильный шаг следования. Каналы сформированы «внутренней пустотой» и наплывами разной толщины затвердевшей жидкой

фазы на керамической поверхности. Внутренняя пустота имеет форму неправильной окружности, диаметр которой изменяется по глубине канала. Некоторые каналы не имеют входных отверстий (закупоренные каналы), а диаметр входной части других каналов не превышает 10 мкм (это видимые центральные отверстия в воронках на дне внешней области прорезанной полости). Диаметр внутренней пустоты в центральной части каналов не превышает 15 мкм, что в 2,5–3,0 раза меньше диаметра пятна сфокусированного лазерного луча. Нижняя часть каналов формируется конусом.

Механизм образования внешней и внутренней области полостей будет проанализирован в следующей статье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием разработанной методики исследован процесс импульсной лазерной прорезки полостей в образцах $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ -керамики. Установлено, что прорезанные полости имеют внешнюю и внутреннюю области, размеры которых определяются параметрами режима импульсного лазерного воздействия. Внешняя область характеризуется нестабильным профилем и волнообразными боковыми поверхностями с характерными гребнями, впадинами, оплавленными шарообразными частицами, сплавленными конгломератами зерен, наплывами затвердевшей жидкой фазы в виде растекшихся капель и брызг разной формы и размеров. Наплывы имеют многослойную структуру и являются результатом многостадийного процесса образования. На границе «твердая керамика – наплыв» образуется крупная трещина, по которой происходят сколы фрагментов наплыва после окончания обработки из-за критических локальных остаточ-

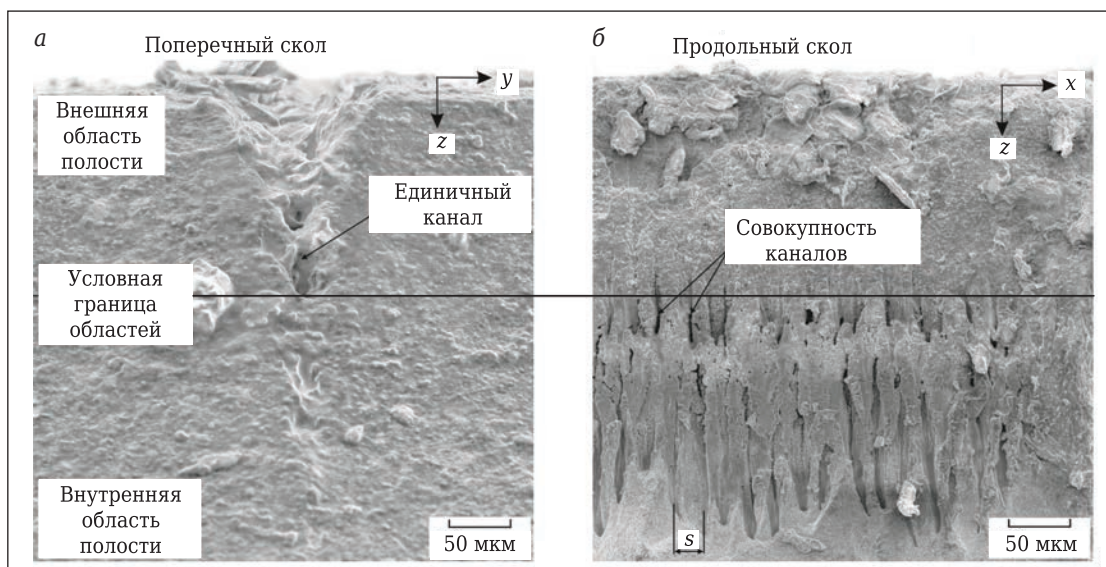


Рис. 4. Внутренняя область прорезанной полости на образцах поперечного (а) и продольного (б) изломов

ных напряжений. Дно внешней области полости покрыто затвердевшей жидкой фазой, в которой имеются воронки с отверстием.

Внутренняя область прорезанной полости в образце Al_2O_3 -TiC-керамики сформирована совокупностью изолированных каналов, имеющих дискретную траекторию и стабильный шаг следования. Эти каналы образованы внутренней пустотой, заключенной в кольцевые наплывы разной толщины. Некоторые каналы являются «закупоренными», а диаметр входной части других каналов не превышает 10

мкм. Диаметр этих каналов изменяется по их глубине, причем наибольший диаметр в 2,5–3,0 раза меньше диаметра пятна сфокусированного лазерного луча.

Вокруг прорезанных полостей на исходной и торцевой поверхностях образцов Al_2O_3 -TiC-керамики образуются наплывы, состоящие из тонкой пленки, покрытой «гратом» и пылевидным слоем. Толщина наплыва увеличивается к краю полости за счет образования валика. Кроме того, на этих поверхностях имеются крупные капли и брызги.

Библиографический список

1. **Арутюнян, Р. В.** Воздействие лазерного излучения на материалы / Р. В. Арутюнян, В. Ю. Баранов, Л. А. Большов [и др.]. — М.: Наука, 1989. — 367 с.
2. **Вакс, Е. Д.** Практика прецизионной лазерной обработки / Е. Д. Вакс, М. Н. Миленький, Л. Г. Сапрыкин. — М.: Техносфера, 2013. — 708 с.
3. **Xu, Z. M.** Research of artificial neural networks in the Al_2O_3 ceramic laser milling application / Z. M. Xu, Z. H. Hong, G. Yang, Q. G. Wang // Appl. Mech. Mater. — 2014. — Vol. 528. — P. 101–106.
4. **Кузин, В. В.** Модификация поверхностного слоя оксидной керамики с использованием непрерывного лазерного излучения / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 1. — С. 51–55.
5. **Kuzin, V. V.** Oxide ceramic surface layer modification using continuous laser radiation / V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 53–57.
6. **Li, Y. H.** Fabrication of microchannels on SiC substrate by femtosecond laser / Y. H. Li, H. Xiao, G. Y. Li, J. Feng, X. D. Li // Adv. Mater. Res. — 2012. — Vol. 557–559. — P. 1322–1325.
7. **Tomczyk, M.** Laser technologies in microsystems / M. Tomczyk, M. Walczak, P. Sęk // Adv. Mater. Res. — 2014. — Vol. 874, № 1. — P. 119–124.
8. **Kuzin, V.** Surface modification of zirconia (Y-TZP) ceramics induced by pulsed laser machining / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Fedorov, M. Portnoy, V. Ermolin // Appl. Mech. Mater. — 2015. — Vol. 752/753 — P. 481–484.
9. **Dai, S. J.** Research on ultra-precision machining of silicon nitride ceramics: a review / S. J. Dai, Y. G. Ren, T. Kong, Y. L. Hu // Adv. Mater. Res. — 2012. — Vol. 497. — P. 294–298.

9. **Кузин, В. В.** Особенности воздействия импульсного лазерного излучения на поверхность керамики ВOK71 в воде / В. В. Кузин, М. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров, Н. Р. Портной // Новые огнеупоры. — 2015. — № 8. — С. 43–46.

10. **Kuzin, V. V.** Features of pulsed laser radiation action on a ceramic VOK71 surface in water / V. V. Kuzin, M. R. Portnoi, S. Yu. Fedorov, N. R. Portnoi // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 394–397.

11. **Rihakova, L.** Laser micromachining of glass, silicon and ceramics. A review / L. Rihakova, H. Chmelickova // Eur. Int. J. Sci. Technol. — 2015. — Vol. 4, № 7. — P. 41–49.

12. **Chen, X.** Improving cutting quality by analysis of microstructure characteristics and solidification behaviour of recast layer formation on laser cut ceramic / X. Chen, L. Ji, Y. Bao, Y. Jiang // J. Eur. Ceram. Soc. — 2012. — Vol. 32, № 10. — P. 2203–2211.

13. **Кузин, В. В.** Воздействие импульсного лазерного излучения на поверхность керамики ВOK71 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 7. — С. 48–52.

14. **Kuzin, V. V.** Effect of pulsed laser radiation on the surface of ceramic VOK71 / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. Yu. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 390–393.

15. **Teixidor, D.** Modeling pulsed laser micromachining of micro geometries using machine-learning techniques / D. Teixidor, M. Grzenda, A. Bustillo [et al.] // J. Intell. Manuf. — 2015. — Vol. 26, № 4. — P. 801–814. ■

Получено 05.03.18

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Фёдоров,
Е. А. Остриков, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Ceramitec 2018
Technologies · Innovations · Materials

10–13 апреля 2018 г.
г. Мюнхен, Германия

<http://www.ceramitec.com>