

УДК 669:535.8

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПЕРФОРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ДИФфуЗИОННО-СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ КЕРАМИКА–МЕДЬ–КЕРАМИКА НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

© 2021 г. Ю. А. Вашуков¹, В. Д. Еленев¹, Ю. А. Железнов², Т. В. Малинский²,
С. И. Миколуцкий², *, Ю. В. Хомич², В. А. Ямщиков²

¹Самарский университет, Московское ш., 34, Самара, 443086 Россия

²Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук,
Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург, 191186 Россия

*e-mail: mikolserg@mail.ru

Поступила в редакцию 29.06.2020 г.

После доработки 01.09.2020 г.

Принята к публикации 07.09.2020 г.

Экспериментально исследовано влияние предварительной лазерной обработки свариваемых поверхностей заготовок из нитрида кремния и медных прокладок на свойства соединения керамика–металл–керамика при диффузионной сварке. Показано, что лазерная перфорация металлических прокладок и лазерное сверление отверстий в поверхности керамических заготовок существенно повышают механические свойства твердофазного сварного соединения.

Ключевые слова: диффузионная сварка, керамика, нитрид кремния, наносекундный лазер, медная прокладка, лазерная перфорация

DOI: 10.31857/S0002337X21020147

ВВЕДЕНИЕ

Такие уникальные свойства, как высокая прочность, твердость, износостойкость, устойчивость к воздействиям агрессивных сред, обусловили востребованность керамики из нитрида кремния (Si_3N_4) в авиационно-космической, металлургической, атомной и других отраслях промышленности [1]. Из-за высокой твердости керамики изготовление деталей сложной формы из нитрида кремния механической обработкой проблематично, поэтому часто используют соединения деталей простой формы с помощью диффузионной сварки [2–4].

Для соединения деталей из керамики или труднодеформируемых металлов используют метод, при котором в зону контакта помещают относительно тонкую металлическую прокладку. Однако использование сплошных прокладок приводит к неравномерности деформации и образованию застойных зон [5, 6], из-за чего сварку приходится проводить при повышенных значениях давления и температуры, соединение происходит с низкой скоростью, образуется несплошной контакт.

Решить данную проблему возможно за счет нанесения на металлическую прослойку отверстий

с диаметром в несколько десятков микрон. Применение перфорированных прокладок при диффузионной сварке позволяет активизировать физико-химические процессы взаимодействия между соединяемыми материалами за счет более интенсивной деформации металла прокладки, что приводит к понижению сварочного давления и уменьшению времени сварки [7] по сравнению с применением сплошных прокладок.

Для получения множества микроотверстий целесообразно использовать лазеры [8, 9], которые дают возможность точного позиционирования и обладают достаточно высокой производительностью. Также лазеры могут применяться для модификации поверхности керамических образцов [10, 11], что делает их перспективным инструментом для подготовки поверхности для диффузионной сварки.

В настоящей работе исследовано влияние предварительной лазерной обработки для создания отверстий в медных прокладках и на контактных керамических поверхностях на механические свойства металлокерамического соединения при диффузионной сварке.

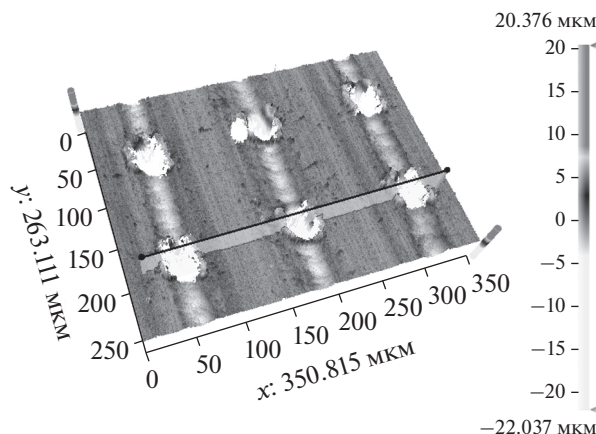


Рис. 1. Изображение поверхности медной фольги с просверленными лазером микроотверстиями, полученное на оптическом профилометре.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для экспериментов использовались заготовки из нитрида кремния цилиндрической формы высотой 10 и диаметром 15 мм. Торцевые поверхности образцов были отшлифованы. Прокладки были изготовлены из медной фольги марки М1 толщиной 100 мкм. Были исследованы три группы сварного соединения. В первой группе сварной прокладкой служила медная фольга без перфорирования. Во второй группе применялась фольга, перфорация которой производилась с помощью излучения Nd:YAG-лазера, генерирующего третью гармонику с длиной волны 355 нм и используемого ранее для обработки металлических и керамических заготовок [10, 12]. При выходной энергии 5 мДж, длительности импульсов 10 нс и частоте следования импульсов 100 Гц лазером были проделаны отверстия диаметром около 30 мкм с расстоянием между отверстиями в 125 мкм (рис. 1). В третьей группе также использовалась перфорированная медная фольга, но дополнительно на свариваемых керамических поверхностях лазером по прямоугольной сетке 8×8 мм и с шагом 1 мм прорезывались отверстия диаметром 0.1 и глубиной 2 мм.

Диффузионная сварка исследуемых образцов осуществлялась на серийной установке промышленного назначения МДВ-301 94 (ООО “Элмик”, РФ). Схема установки для диффузионной сварки показана на рис. 2. Сварочная камера установки в форме прямоугольного параллелепипеда имеет объем приблизительно 60 дм^3 , предельно достижимая степень разрежения атмосферы в ней порядка 10^{-3} Па. В конструкцию установки входит пневмоцилиндр, который может развивать усилия до 5500 кН.

В вакуумную камеру установки вмонтировано специально разработанное приспособление, обес-

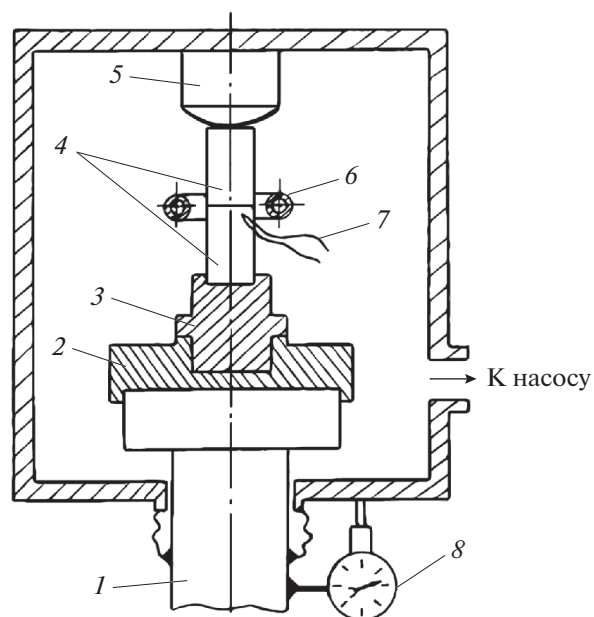


Рис. 2. Схема установки для диффузионной сварки: 1, 5 – нижний (подвижный) и верхний штоки вакуумной камеры соответственно; 2 – центрирующий фланец; 3 – вкладыш (сменный); 4 – свариваемые керамические образцы; 6 – индуктор; 7 – термопара; 8 – индикатор.

печивающее сборку опытных образцов, регулировку их положения (высоты) в камере, а также сварку (рис. 2). Приспособление состоит из двух основных деталей: центрирующего фланца 2, установленного на нижнем подвижном штоке 1 вакуумной камеры, и вставленного в него вкладыша 3. Вкладыш 3 является сменным, благодаря чему в данном устройстве можно закреплять образцы различного диаметра, а также регулировать по высоте положение стыка свариваемых образцов 4 относительно индуктора 6.

Нагрев свариваемых деталей проводился с помощью токов высокой частоты (ТВЧ), вырабатываемых входящим в комплект установки генератором типа ЛЗ-67В (мощность 60 кВт, частота 66 кГц). Между индуктором и керамическим образцом размещался специальный экран из графита и молибдена, который при включенном генераторе ТВЧ являлся источником нагрева керамического образца.

Контроль термического цикла сварки и поддержание заданной температуры проводились с помощью хромель-алюмелевой термопары и потенциометра типа КСП-4. Спай термопары зачеканивался в предварительно просверленное в керамическом образце отверстие на глубину 1.5–2.0 мм на расстоянии примерно 1 мм от плоскости стыка. Потенциометр КСП-4 помимо выполнения контрольной функции использовался для поддержания температуры сварки на заданном уровне.

Степень разрежения атмосферы в камере измеряли с помощью вакуумных манометрических преобразователей типа ПМТ-2 и ПМИ-2 и вакуумметра типа ВИТ-2П. Для обеспечения контроля величины деформации образцов в осевом направлении (осадка соединения) в процессе сварки в конструкцию установки введен индикатор δ часового типа (рис. 2).

Сварка проводилась в вакууме около 10^{-2} мм рт. ст. Температура сварки варьировалась в диапазоне от 900 до 1030°C, давление сжатия – от 8 до 20 МПа. Время сварки составляло 20 мин. При использовании перфорированных прокладок время выдержки под давлением сокращалось до 15 мин.

После сварки образцы подвергались механическим испытаниям на трехточечный изгиб. Устройство состояло из двух опор, соединяющей их перемычки и двух узлов – цангового зажима и удлинителя для закрепления испытываемого сварного образца. Также измерялись величины сдвиговых деформаций и определялся характер их распределения в сплошной и перфорированной прокладках.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для сравнения прочностных характеристик и деформационной способности сварных соединений проводились экспериментальные исследования следующих групп соединений керамика–медь–керамика: со сплошными медными прокладками, с перфорированными медными прокладками, с перфорированными медными прокладками и с отверстиями на поверхности керамики (рис. 3).

Проведенные испытания показали, что при использовании сплошной прокладки и температуре сварки менее 950°C прочность соединения крайне нестабильна и изменяется в широких пределах: от 8 до 50 МПа. При этом увеличение времени сварки более 30 мин к улучшению механических свойств не приводит. Повышение температуры до 1000–1050°C приводит к росту прочности соединения от 61 МПа (рис. 3а). При этом степень деформации ϵ (рис. 3б) составляла 19–30%.

При использовании перфорированных прокладок прочностные характеристики составили 77–82 МПа. Дополнительное нанесение отверстий на керамические поверхности дало увеличение прочности до 85–91 МПа. Степень деформации для второй и третьей групп образцов также увеличивается – до 32 и 33% соответственно. Значит, предварительная лазерная обработка металлокерамических поверхностей соединения улучшает механические свойства шва при диффузионной сварке.

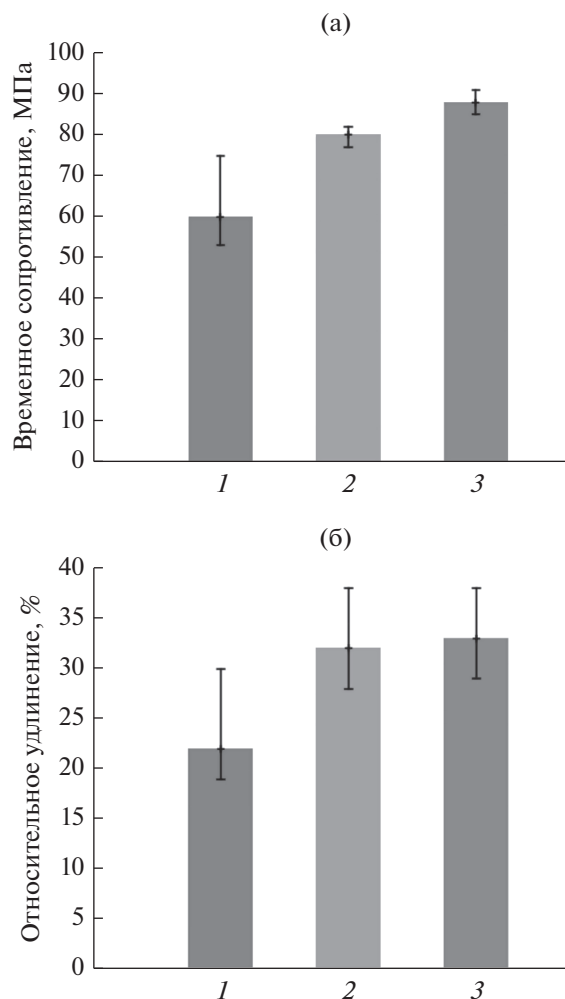


Рис. 3. Предел прочности (а) и степень деформации (б) сварных соединений керамических заготовок из Si_3N_4 при использовании сплошной медной прокладки (1), перфорированной медной прокладки (2), перфорированной медной прокладки и перфорированных отверстий на контактных керамических поверхностях (3).

Известно, что наиболее благоприятные условия для активации поверхностей деталей и их соединения образуются в зоне действия касательных напряжений и деформаций сдвига. Для оценки влияния деформаций на прочность и относительное удлинение сварных соединений были проведены измерения распределения деформаций в соединениях со сплошной медной прокладкой и прокладкой с перфорированными отверстиями с шагом 1.75 мм и радиусом 250 мкм (рис. 4).

Для сплошной прокладки (рис. 4а) при давлении около 8 МПа сдвиговые деформации незначительны. С повышением давления сварного процесса до 15–20 МПа сдвиговые деформации растут, однако наблюдается их локализация в относительно узкой краевой области. Расширить область дефор-

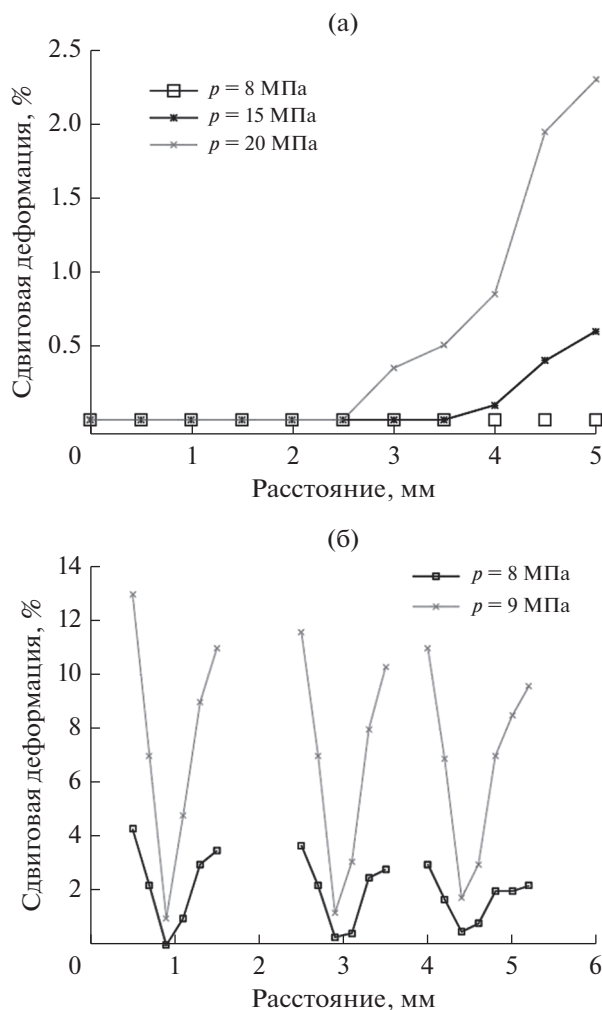


Рис. 4. Зависимости распределения величины сдвиговых деформаций от расстояния до центра в сплошной (а) и в перфорированной (б) прокладке на расстоянии 10–20 мкм от поверхности контакта для различных значений давления сварки при температуре 1030°С.

маций можно путем дальнейшего увеличения давления сварного процесса, но диапазон давлений ограничен прочностью керамики.

На рис. 4б приведена зависимость распределения величины сдвиговых деформаций от расстояния до центра для соединения с перфорированной медной прокладкой. В этом случае почти на порядок увеличиваются абсолютные величины сдвиговых деформаций по сравнению со сплошными прокладками. Деформации уже не локализованы в краевой зоне, а распределены более равномерно по всей контактной поверхности и также растут с повышением давления. При использовании перфорированной прокладки оказалось возможным провести сварочный процесс при давлении намного меньшем, чем предел прочности керамики.

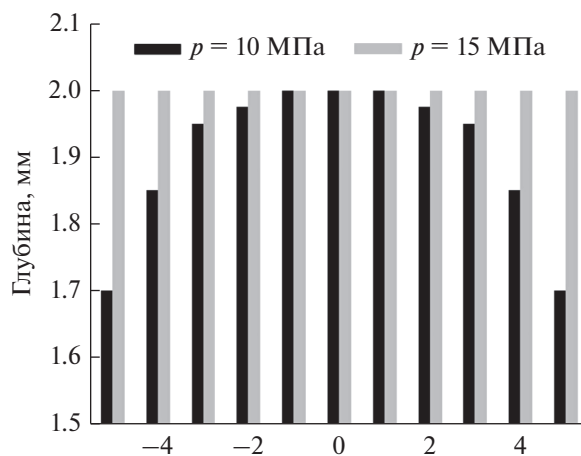


Рис. 5. Глубина заполнения перфорационных каналов по радиусу керамических заготовок.

На рис. 5 для третьей группы сварного соединения с лазерным нанесением перфорационных каналов на контактные поверхности керамических заготовок показана зависимость глубины заполнения каналов по радиусу от расстояния до центра заготовок. При давлении сварки 10 МПа неполное заполнение каналов наблюдается уже на расстоянии 2 мм от центра свариваемых заготовок. Увеличение давления до 15 МПа приводит к полному заполнению каналов по всей контактной поверхности, что обеспечивает повышение прочности сварного соединения.

Экспериментальные данные показывают улучшение механических свойств сварного соединения при использовании перфорированных прокладок по сравнению со сплошными. Это обусловлено изменением напряженно-деформированного состояния прокладки и прилегающей к ней области. На характеристики сварного соединения разнородных материалов оказывают влияние остаточные напряжения рядом с границей металл/керамика в зоне соединения [13], а также изменение механических свойств керамики вблизи зоны соединения, в частности появление микротрещин [14]. Поле остаточных напряжений в диффузионно-сварных соединениях разнородных материалов формируется вследствие различия физико-механических характеристик, в особенности коэффициента термического линейного расширения. Величина и характер распределения остаточных напряжений зависят от геометрических факторов, типа соединения и параметров процесса сварки. При этом увеличение сварочного давления и времени воздействия на свариваемые материалы могут привести к нежелательным эффектам (образованию микротрещин в керамическом материале), снижающим качество сварного соединения. Этим, в частности, объясняется отсутствие увели-

чения прочности соединения при увеличении времени процесса сварки до 30 мин и более.

Одним из факторов, снижающих прочность соединений со сплошными прокладками, является неравномерное распределение напряжений в прослойке. В центральной части наблюдается в основном нормальная составляющая напряжений, а необходимая для получения соединения при достаточно низких температурах и давлениях тангенциальная составляющая увеличивается с удалением от центра. Это подтверждается графиком на рис. 3а: на расстояниях до нескольких миллиметров от центра соединения сдвиговые деформации близки к нулю, обуславливая появление застойных зон.

Изучение влияния перфорированных прокладок на кинетику формирования физического контакта металл–керамика и прочностные характеристики полученных сварных соединений показало, что металл прокладки подвержен деформации по схеме давление + сдвиг и деформируется с высокой скоростью (3.5×10^{-2} мин⁻¹). Такое воздействие обусловлено изменением напряженно-деформированного состояния перфорированной прокладки (по сравнению со сплошной) в процессе ее деформации [6, 7, 15, 16]. В этом случае более значительные сдвиговые деформации возникают во всем объеме металла прокладки и распределены более равномерно по контактной поверхности, чем в случае сплошной прокладки, где эти деформации развиты лишь в краевой области (рис. 4).

Выбранные размеры и шаг отверстий обеспечили в процессе сварки трансформацию перфорированной прокладки в сплошную, что увеличивает прочность сварного соединения вследствие снижения послесварочных остаточных напряжений и контактного упрочнения пластичной прокладки [6]. Кроме того, в условиях диффузионной сварки области неравномерных атомно-вакансионных состояний являются источниками аномально интенсивных потоков вакансий и дислокаций, обуславливающих большие скорости массопереноса в материале. Это повышает химическую активность материала прокладки и облегчает его взаимодействие со свариваемым материалом. Данные факторы позволили при использовании перфорированной прокладки повысить предел прочности шва на 30% (рис. 3а).

Наблюдаемое на рис. 3а увеличение предела прочности сварного соединения до 85–91 МПа при сочетании перфорирования металлической прокладки и керамических поверхностей также можно объяснить интенсификацией и равномерностью деформационного процесса. При этом деформация металла прослойки в условиях давление + сдвиг может быть осуществлена не толь-

ко благодаря наличию отверстий в деформируемой прокладке, но и за счет отверстий в керамике.

Еще одна причина повышения прочности, по мнению авторов, связана с появлением армированных каналов в керамике. Если в контактной поверхности керамики создать систему отверстий, то при сварке металл прокладки начнет затекать в эти отверстия вследствие развития деформаций. Постепенно отверстия заполнятся металлом, и приконтактная зона керамического материала будет представлять собой композит хрупкая матрица/пластичные волокна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных экспериментов установлено, что использование при диффузионной сварке перфорированных наносекундным лазером медных прокладок и керамики Si₃N₄ с микроструктурированной поверхностью позволяет:

- интенсифицировать пластическую деформацию материала перфорированной прокладки, что существенно влияет на кинетику образования сварного соединения, и сделать распределение деформаций по поверхности соединения существенно более равномерным по сравнению со сплошной прокладкой;

- при использовании только перфорированных прокладок увеличить предел прочности соединения до 77–82 МПа, а величину относительного удлинения до 28–38% по сравнению с 53–75 МПа и 18–30% соответственно для неперфорированных прокладок;

- в случае сочетания перфорированных прокладок и перфорированных отверстий на контактных поверхностях керамики получить сварные соединения, имеющие прочность в среднем в 1.45 раза большую, чем соединения со сплошной прокладкой, при одновременном увеличении средних значений относительного удлинения почти на 50%;

- снизить основные параметры процесса сварки, при которых формируются высокопрочные соединения, а именно: время, давление и температуру.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках темы № 0057-2019-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bocanegra-Bernal M., Matovic B. Mechanical Properties of Silicon Nitride-Based Ceramics and Its Use in Structural Applications at High Temperatures // Mater. Sci. Eng. A. 2010. V. 527. P. 1314–1338.*

2. Fang F., Zheng C., Lou H.Q., Sui R.Z. Bonding of Silicon Nitride Ceramics Using Fe–Ni/Cu/Ni/Cu/Fe–Ni Interlayers // Mater. Lett. 2001. V. 47. P. 178–181.
3. Brochu M., Pugh M.D., Drew R.A.L. Joining Silicon Nitride Ceramic Using a Composite Powder as Active Brazing Alloy // Mater. Sci. Eng. A. 2004. V. 374. P. 34–42.
4. Вашуков Ю.А., Демичев С.Ф., Еленев В.Д., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Лазерная обработка поверхности металлических сплавов для диффузионной сварки // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 82–87.
5. Лямин Я.В., Мусин Р. Деформируемость перфорированных прокладок при диффузионной сварке // Сварочное производство. 1994. С. 24–26.
6. Лямин Я.В. Модель трансформации перфорированной прокладки в сплошную при диффузионной сварке материалов // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. 2010. Т. 12. С. 25–31.
7. Бордаков П. Активация схватывания разнородных материалов при контактном взаимодействии в вакууме // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1999. Т. 2. С. 65–69.
8. Tokarev V.N., Cheshev E.A., Bezotosnyi V.V., Khomich V.Yu., Mikolutskiy S.I., Vasil'eva N.V. Optimization of Plasma Effect in Laser Drilling of High Aspect Ratio Microvias // Laser Phys. 2015. V. 25. P. 056003.
9. Токарев В.Н., Чешев Е.А., Малинский Т.В., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А., Железнов Ю.А., Безотосный В.В., Артемов В.Г. Подавление нежелательного эффекта плазменного плавления боковых стенок скважины при лазерном сверлении // УПФ. 2013. Т. 1. № 6. С. 686–691.
10. Zheleznov Yu.A., Malinskiy T.V., Khomich Yu.V., Yamshchikov V.A. The Effect of a Scanning Nanosecond Laser Pulse Beam on the Microtopography of Ceramic Al_2O_3 Coatings // Inorg. Mater.: Appl. Res. 2018. V. 9. № 3. P. 460–463.
11. Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. Основы создания систем электроразрядного возбуждения мощных CO_2 -, N_2 - и F_2 -лазеров. М: Физматлит, 2014. 168 с.
12. Ёлкин В.Н., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Хасая Р.Р., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Влияние облучения наносекундными лазерными импульсами на структуру поверхности сплавов металлов // ФХОМ. 2016. № 6. С. 5–12.
13. He Y., Zhang J., Li X. Characterization of the Si_3N_4/Si_3N_4 Joints Fabricated Using Particles Modified Braze // Mater. Sci. Eng. A. 2014. V. 616. P. 107–115.
14. Hattali M., Mesrati N., Tréheux D. Electric Charge Trapping, Residual Stresses and Properties of Ceramics after Metal/Ceramics Bonding // J. Eur. Ceram. Soc. 2012. V. 32. P. 717–725.
15. Перевезенцев В.Н., Пупынин А.С., Свирина Ю.В. Анализ влияния пластической деформации на диффузионные свойства границ зерен // ФММ. 2005. Т. 100. № 1. С. 17–23.
16. Люшинский А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов. М.: Академия, 2006. 208 с.