



Улучшение механических свойств металлокерамических соединений при предварительной лазерной обработке

В. Ю. Железнов, Т. В. Малинский, С. И. Миколуцкий, Ю. В. Хомич

Исследована возможность применения наносекундных лазерных импульсов для перфорации элементов диффузионно-сварного соединения типа керамика-металл-керамика. Экспериментально продемонстрировано улучшение механических свойств соединений с предварительно обработанными импульсно-периодическим Nd:YAG-лазером элементами по сравнению с необработанными. В частности, показано увеличение предела прочности соединения с обработанными элементами до 40 % и относительного удлинения до 50 % по сравнению с металлокерамическими соединениями без лазерной обработки. Также проведены сравнительные исследования распределения деформаций в диффузионно-сварных соединениях с предварительной лазерной обработкой и без нее. Полученные результаты позволяют снизить энергозатраты на проведение процесса диффузионной сварки и повысить качество соединений разнородных материалов в целом.

Ключевые слова: наносекундные импульсы, лазерная перфорация, металлокерамические соединения, медная прослойка, диффузионная сварка.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-6-584-592

Введение

Керамические материалы благодаря своим высоким прочности и твердости, износостойкости и устойчивости к агрессивным средам имеют довольно большую востребованность в авиационной, космической, атомной, машиностроительной, и других отраслях промышленности. Однако вследствие перечисленных свойств обработка и изготовление деталей

сложной формы из керамики становятся проблематичными, поэтому все чаще используют метод диффузионной сварки [1–3] для соединения деталей простой формы в более сложные конструкции.

В работах [3, 4] было показано, что при диффузионной сварке разнородных материалов за счет формирования на свариваемых поверхностях микронных и субмикронных структур посредством наносекундного лазерного излучения возможно улучшение механических свойств сварного шва. В случае диффузионно-сварного соединения деталей из керамики или труднодеформируемых металлов применяется особый метод, при котором в зону контакта помещают тонкую металлическую прослойку. Основными недостатками использования сплошных прослоек являются неравномерность деформации и образование застойных зон [5, 6], из-за чего может наблюдаться неполное формирование физического контакта, и процессы соединения деталей

Железнов Вячеслав Юрьевич¹, м.н.с., аспирант.
Малинский Тарас Владимирович¹, зав. лаб., к.т.н.
Миколуцкий Сергей Иванович^{1,2}, в.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: mikolserg@mail.ru

Хомич Юрий Владиславович¹, с.н.с., к.т.н.

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Россия, 191186, С.-Петербург, Дворцовая наб., 18.

² Самарский университет.

Россия, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2022 г.

© Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И.,
Хомич Ю. В., 2022

приходится проводить при повышенных значениях давления и температуры.

Решение данной проблемы возможно за счет нанесения на металлическую прослойку микроотверстий [7, 8], что позволяет активизировать физико-химические процессы взаимодействия между материалами соединения за счет более интенсивной пластической деформации металла прокладки [5] по сравнению с применением сплошных прокладок. Использование механических технологий сверления прокладок имеет ряд недостатков: продолжительное время сверления и быстрый износ сверла малого диаметра, а также трудности изготовления игольчатых пресс-форм, имеющих высокую плотность расположения иголок.

Для получения множества микроотверстий в работе предлагается использовать наносекундные лазеры, которые зарекомендовали себя во многих областях науки и техники [9–13] и успешно применялись в различных методах поверхностного лазерного микро- и наноструктурирования [14–19]. Такой подход даст возможность точного позиционирования микроотверстий с достаточно высокой производительностью. Помимо этого, наносекундные лазеры могут применяться для модификации поверхности керамических образцов [20], что делает их перспективным инструментом для подготовки поверхности для последующей диффузионной сварки.

Методика эксперимента

В качестве источника лазерного излучения для формирования микроотверстий был использован наносекундный Nd:YAG-лазер, работающий на третьей гармонике с длиной волны излучения 355 нм (выходная энергия 5 мДж, длительность импульсов 10 нс и частота следования импульсов 100 Гц). Схема экспериментальной установки для лазерной перфорации материалов представлена на рис. 1. Часть лазерного излучения от наносекундного лазера 1 проходила через открытый затвор 2 и направлялась полупрозрачной пластинкой 3 на приемник излучения 4 (NOVA II, Ophir Optics Inc., USA) для контроля количества импульсов лазерного излучения. Линза 5 фокусировала лазерный луч на плоскости обрабатываемой медной фольги 6. За обрабатываемой фольгой был установлен приемник излучения 7 (PESO-SH_V2) для регистрации

лазерного излучения после образования отверстия. Обрабатываемый материал помещался на трехкоординатный столик 8, управляемый от контроллера 9. Программирование контроллера осуществлялось с помощью компьютера 10. Трехкоординатный столик перемещал требуемый участок фольги в зону лазерного пучка и останавливался. Выбранный участок обрабатывался заданное время при определенной частоте лазерными импульсами. Для получения отверстий в медной фольге толщиной 100 мкм требовалось примерно 200 лазерных импульсов. При сигнале с приемника 7 образец перемещался на новый участок фольги.

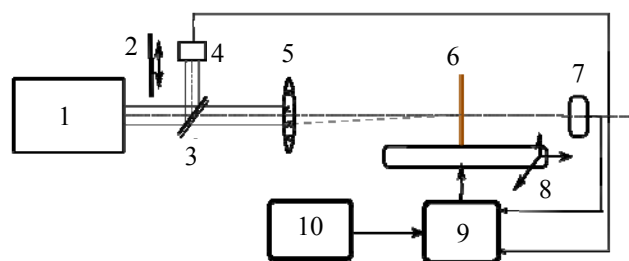


Рис. 1. Схема установки для лазерного сверления отверстий: 1 – рабочий лазер; 2 – затвор; 3 – полупрозрачная пластинка; 4 – приемник излучения; 5 – линза; 6 – обрабатываемая фольга; 7 – приемник излучения; 8 – трехкоординатный столик; 9 – контроллер; 10 – компьютер

Для экспериментов были использованы прокладки, изготовленные из медной фольги марки М1 толщиной 100 мкм. В качестве керамического материала использовались образцы из нитрида кремния цилиндрической формы высотой 10 мм и диаметром 15 мм с отшлифованными торцевыми поверхностями.

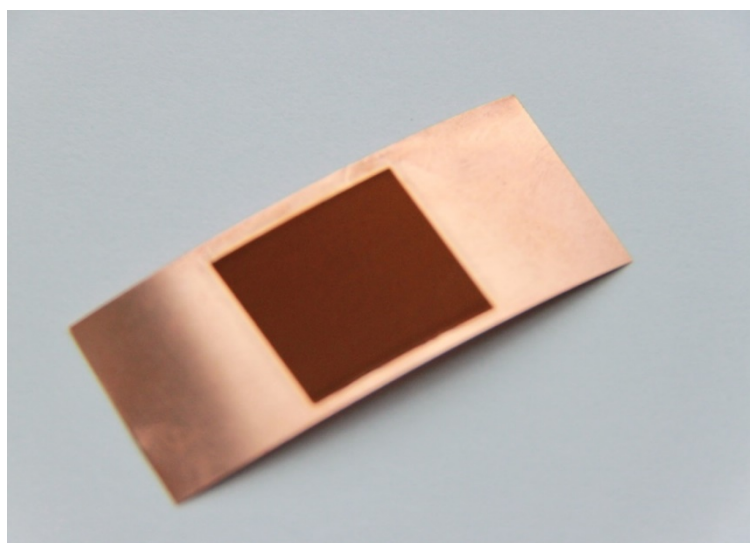
Для исследования влияния лазерной перфорации наносекундными импульсами на эксплуатационные свойства металллокерамического соединения были рассмотрены три типа диффузионно-сварных соединений. Первый тип (I) состоял из необработанных лазерным излучением медной прослойки и двух цилиндрических образцов керамики из нитрида кремния. Во втором типе (II) использовалась прослойка, перфорированная наносекундными импульсами Nd:YAG-лазера с длиной волны 355 нм. Третий тип (III) представлял из себя соединение перфорированной медной фольги с керамическими образцами, на поверхности которых лазером были также сделаны углубления.

Топография обработанной поверхности исследовалась с помощью профилометра NewView 7300 (ZYGO Corp.). Диффузионная сварка осуществлялась в сварочной камере с возможностью откачки до 10^{-3} Па и пневмоцилиндром для механического сжатия образцов с усилием до 5500 кН при нагреве свариваемых деталей токами высокой частоты. После сварки проводились механические испытания полученных металлокерамических соединений на трехточечный изгиб с измерением прочностных характеристик и сдвиговых деформаций в металлических прослойках.

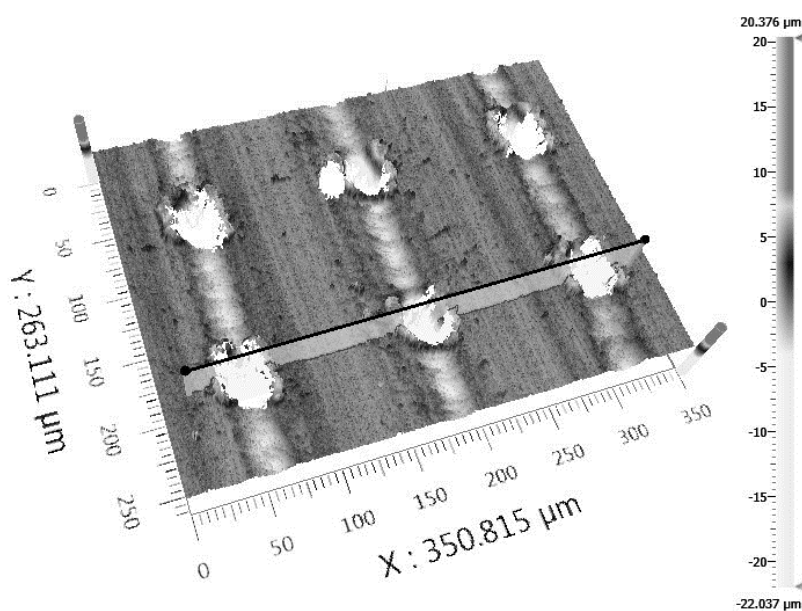
Результаты и их обсуждение

Сверление микроотверстий в медной прослойке осуществлялось лазерным лучом, перемещаемым вдоль поверхности по траектории «змейка» и фиксируемым в зонах перфорации. Размер общей обрабатываемой области определялся размером свариваемых цилиндрических заготовок диаметром около 15 мм.

Общий вид обработанной медной прослойки показан на рис. 2а. Изображение нескольких микроотверстий, полученное с помощью профилометра, показано на рис. 2б.



а



б

Рис. 2. Перфорированная Nd:YAG-лазером медная прослойка: а – общий вид; б – изображение нескольких отверстий, полученное с помощью профилометра

Как видно из рис. 2, со стороны входа лазерного луча диаметр отверстия составлял от 30 до 40 мкм. Высота брустеров, связанных с направлением материала, в среднем достигала 10 мкм по высоте. Среднее расстояние между отверстиями было 125 мкм. Экспериментальная установка, представленная на рис. 1, позволяла регулировать расстояние между отверстиями, тем самым определяя коэффициент перфорации металлической прокладки [5].

Причем выводы из теоретической модели трансформации перфорированной прокладки при диффузионной сварке материалов, предложенной в работе [5], показывают необходимость уменьшения диаметра отверстий, просверливаемых в металлической прокладке. Основным уравнением модели является следующее выражение:

$$r_t = \sqrt{\frac{r_n^2 \cdot \varepsilon_t - r_0^2}{\varepsilon_t - 1}}, \quad (1)$$

где r – радиус перфорированных отверстий, r_n – радиус нейтральной поверхности (половина расстояния между центрами соседних отверстий), r_0 – начальный радиус отверстия до диффузионной сварки, ε_t – степень деформации металлической прокладки. Из выражения (1) следует, что величина деформации и коэффициент перфорации (отношение площади отверстий к площади обрабатываемого материала) зависят от начального радиуса просверленных отверстий следующим образом [5]:

$$\varepsilon_{tr} = \frac{r_0^2}{r_n^2}, \quad (2)$$

$$K_{p0} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{r_0}{r_n} \right)^2. \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) видно, что степень деформации и коэффициент перфорации определяются радиусом отверстия: чем он меньше, тем меньше деформация самой прокладки. Также следует отметить, что для трансформации перфорированной прокладки в сплошную в процессе диффузионной сварки требуется, чтобы накопленная деформация превышала начальный коэффициент перфорации приблизительно в 1,1 раза ($2\sqrt{3}/\pi$). Значит, чем меньше коэффициент перфорации,

тем меньше необходимо приложить усилий для деформации прокладки во время сварки.

Диаметр отверстия при лазерной перфорации зависит от размера сфокусированного пятна, который в свою очередь определяется известной формулой для дифракционного предела лазерных лучей в дальнем поле:

$$d - \frac{\lambda}{2n \cdot \sin \alpha} = 0, \quad (4)$$

где λ – длина волны лазерного излучения, n – показатель преломления окружающей среды, α – угол расхождения лазерного луча, d – минимальный диаметр лазерного пятна. Из выражения (4) следует, что для достижения меньшего диаметра пятна необходимо использовать короткие длины волн из области УФ и ВУФ-излучения. На качество обработки материалов также будет влиять длительность импульсов излучения, определяющая плотность мощности в импульсе. С учетом этого в работе и было использовано излучение третьей гармоники твердотельного наносекундного Nd:YAG-лазера на длине волны 355 нм.

После лазерной обработки медной фольги и керамики формировались три типа соединений (рис. 3), и проводилась их диффузионная сварка в вакуумной камере при остаточном давлении около 10^{-2} мм ртутного столба. Температура сварки варьировалась в диапазоне от 900 °С до 1050 °С, а давление сжатия – от 8 до 20 МПа. После сварки образцы подвергались механическим испытаниям на трехточечный изгиб, были измерены предел прочности и степень деформации, а также величины сдвиговых деформаций в сплошной и перфорированной прослойках.

Результаты механических испытаний соединений, полученных при температуре сварки 1000–1050 °С, представлены в таблице. Стоит отметить, что при температуре сварки менее 950 °С и использовании сплошной прослойки прочность соединения была крайне нестабильной и изменялась в широких пределах от 8 до 50 МПа, а увеличение времени сварки более 30 минут не приводило к улучшению механических свойств. Повышение температуры до 1000–1050 °С влекло за собой рост прочности соединения со сплошной прослойкой до 61 МПа (таблица). При этом степень деформации составляла около 22 % (таблица).

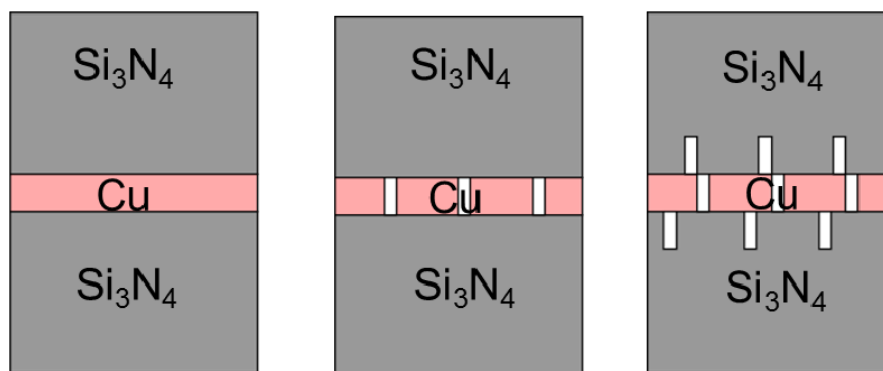


Рис. 3. Схематическое изображение типов диффузионно-сварных керамики с медью: I – сплошная прослойка; II – перфорированная прослойка; III – перфорированная прослойка и углубления на поверхности керамики

Таблица

Механические свойства металлокерамических соединений различными типами обработки элементов

Тип обработки	Предел прочности, МПа	Степень деформации, %
I (сплошная прослойка)	$\frac{53 \div 75}{61}$	$\frac{19 \div 30}{22}$
II (перфор. прослойка)	$\frac{77 \div 82}{79}$	$\frac{28 \div 38}{32}$
III (перфор. прослойка и обработ. керамика)	$\frac{85 \div 91}{88}$	$\frac{29 \div 38}{33}$

При использовании перфорированных прослоек предел прочности составил приблизительно 79 МПа. Причем нанесение дополнительных углублений на керамические поверхности привело к увеличению предела прочности до 88 МПа. Степень деформации для второго и третьего типа соединений также увеличивалась до 32 % и 33 %, соответственно. Таким образом, предварительная лазерная обработка медной прослойки и керамических поверхностей привела к значительным улучшениям механических свойств соединения при диффузионной сварке.

Выбор оптимальных размеров и шага между отверстиями может обеспечить трансформацию перфорированной лазерным излучением прокладки в процессе сварки в сплошную, что позволит еще больше увеличить прочность сварного соединения вследствие снижения послесварочных остаточных напряжений и контактного упрочнения пластичной металлической прослойки [5]. Помимо этого, в условиях диффузионной сварки области неравномерных атом-вакансионных состояний

являются источниками аномально интенсивных потоков вакансий и дислокаций, обуславливающих большие скорости массопереноса в материале и его высокую химическую активность. В данном случае это повышает химическую активность материала прослойки и его взаимодействие со свариваемым материалом.

Увеличение предела прочности сварного соединения до 88 МПа (таблица) при сочетании перфорированной металлической прослойки и углублений в керамических поверхностях также можно объяснить интенсификацией и улучшением равномерности деформационного процесса. При этом происходит аналогичная деформация металла прокладки в условиях «давление + сдвиг», которая может быть осуществлена не только благодаря наличию отверстий в деформируемой прослойке, но и за счет отверстий в керамике. С наличием углублений в керамике связана еще одна причина повышения прочности – появление армированных каналов в керамике. При диффузионной сварке металл прослойки будет затекать в отверстия на поверхности керамики

вследствие развития деформаций. Постепенно отверстия заполнятся металлом, и приконтактная зона керамического материала будет представлять собой «композит» – «хрупкая матрица – пластичные волокна».

Для оценки влияния касательных напряжений и деформаций сдвига на прочность сварных соединений были проведены измерения распределения деформаций в соединениях со сплошной и перфорированной медными прослойками. Причем в данном случае шаг между просверленными лазером отверстиями составлял 1750 мкм, а их радиус – 250 мкм. Результаты измерений представлены на рис. 4.

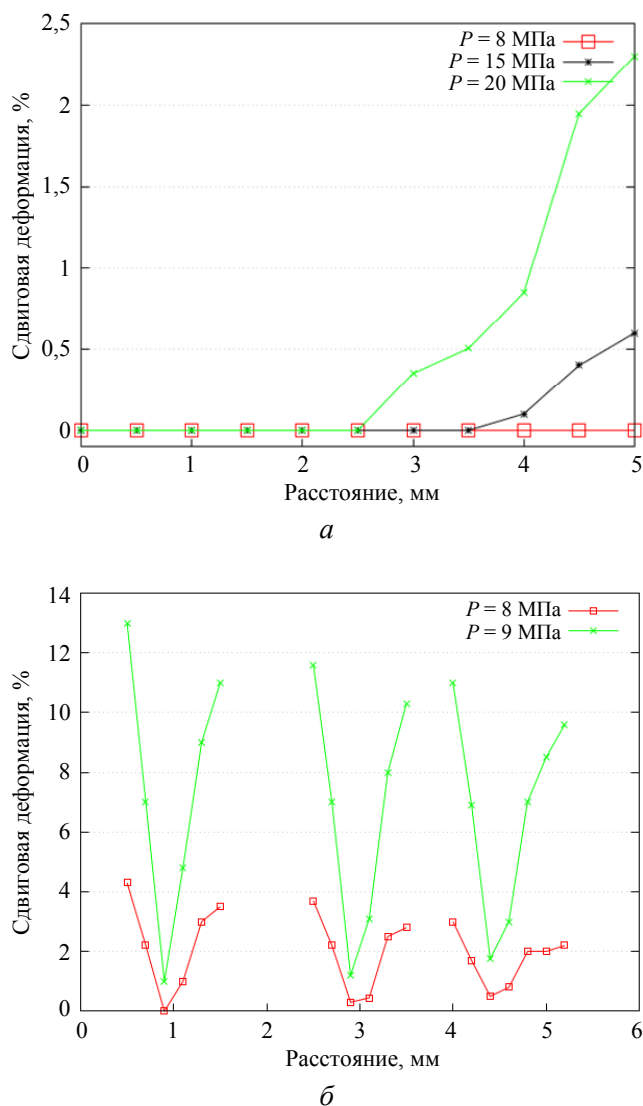


Рис. 4. Зависимость распределения величины сдвиговых деформаций от расстояния до центра в медной прослойке на расстоянии 10–20 мкм от поверхности контакта для различных значений давления сварки P при температуре $T = 1030^\circ\text{C}$: а – сплошная прослойка; б – перфорированная прослойка

В соединениях со сплошной прослойкой (рис. 4а) при относительно невысоких давлениях около 8 МПа сдвиговые деформации незначительны. При повышении давления диффузионно-сварного процесса до 15–20 МПа сдвиговые деформации увеличиваются, но наблюдается их локализация в достаточно узкой краевой зоне. Расширить зону таких деформаций можно посредством дальнейшего увеличения давления диффузионно-сварного процесса, однако диапазон давлений ограничивается прочностью керамики.

В случае соединения с перфорированной прослойкой зависимость распределения величины сдвиговых деформаций от расстояния до центра имеет вид, показанный на рис. 4б. Как видно, абсолютные величины сдвиговых деформаций почти на порядок больше по сравнению с соединениями со сплошными прослойками. Отличительной чертой является то, что деформации уже не локализованы в краевой зоне, а распределены более равномерно по всей контактной поверхности и увеличиваются с повышением давления. Из приведенных результатов следует, что при использовании перфорированной прослойки возможно провести сварочный процесс при давлениях значительно ниже предела прочности керамики, что опять же положительно скажется на механических свойствах металлокерамических соединений.

Улучшение механических свойств диффузионно-сварного соединения при использовании обработанных наносекундным лазером прослоек обусловлено изменением напряженно-деформированного состояния прослойки и прилегающей к ней области. Помимо изменения механических свойств керамики вблизи зоны соединения, например, появление микротрещин [21], на параметры сварного соединения разнородных материалов влияют остаточные напряжения рядом с границей «металл-керамика» в зоне соединения [22], которые были сформированы вследствие различия физико-механических характеристик материалов, в особенности коэффициента термического расширения.

Значение и характер распределения остаточных напряжений определяются геометрическими факторами, видом соединения и параметрами процесса сварки. Причем увели-

чение давления сварки и времени воздействия на свариваемые материалы могут привести к образованию микротрещин в керамическом материале, которые снижают качество сварного соединения. Это объясняет отсутствие увеличения прочности соединения при увеличении времени процесса сварки до 30 минут и выше.

Неравномерное распределение напряжений в прослойке является одним из факторов, снижающим прочность соединений со сплошными прослойками. Для получения соединения при достаточно низких температурах и давлении необходима тангенциальная составляющая, которая в случае сплошной прослойки увеличивалась с некоторым удалением от центра (рис. 4а), тогда как в центральной части наблюдалась в основном нормальная составляющая напряжений и сдвиговые деформации были близки к нулю, обуславливая появление застойных зон.

В случае перфорированных прослоек исследование кинетики формирования физического контакта металл–керамика и прочностных характеристик полученных сварных соединений показало, что металл прослойки подвержен деформации по схеме «давление + сдвиг» и деформируется с высокой скоростью ($3,5 \times 10^{-2} \text{ мин}^{-1}$). Такое воздействие обусловлено изменением напряжённо-деформированного состояния перфорированной прослойки (по сравнению со сплошной) в процессе её деформации [5]. Более значительные сдвиговые деформации возникают во всём объёме прослойки, и распределены более равномерно по контактной поверхности, чем в случае сплошной прокладки, где эти деформации развиты лишь в краевой области (рис. 4).

Заключение

В настоящей работе продемонстрирована перспективность применения наносекундных УФ-лазеров в методе предварительной лазерной перфорации микроотверстий как в металлических прокладках, так и на поверхности керамических заготовок для улучшения процесса диффузионной сварки соединений типа керамика–металл–керамика.

В ходе проведённых экспериментов было установлено, что предварительная лазерная

обработка медной прослойки и керамических поверхностей позволила интенсифицировать пластическую деформацию материала перфорированной прослойки, что существенно повлияло на кинетику образования сварного соединения и сделало распределение деформации по поверхности соединения существенно более равномерным по сравнению со сплошной прослойкой. Это привело к значительным улучшениям механических свойств металлокерамического соединения при диффузионной сварке.

Помимо заметного увеличения предела прочности соединения до 79 МПа и величины относительного удлинения до 32 % при использовании только перфорированных прослоек (против 61 МПа и 22 % для неперфорированных прокладок), в случае сочетания перфорированных прослоек с использованием углублений на поверхностях керамики удалось получить сварные соединения, имевшие прочность до 88 МПа и относительное удлинение до 33 %, что говорит об улучшении механических характеристик соединений вплоть до 50 % по сравнению с исходными образцами.

Таким образом, предложенный в работе метод предварительной лазерной перфорации элементов металлокерамических соединений с применением наносекундных лазеров позволяет улучшить механические свойства соединений и снизить такие основные параметры процесса сварки, как время, давление и температура, что безусловно может быть успешно использовано в атомной, машиностроительной и авиакосмической отраслях промышленности.

Результаты исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (Проект № 0777-2020-0015) и (Проект FFGR-2022-0001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Fang F., Zheng C., Lou H. Q., Sui R. Z. // Mater. Let. 2001. Vol. 47. P. 178.
2. Brochu M., Pugh M. D., Drew R. A. L. // Mater. Sci. Eng. A. 2004. Vol. 374. P. 34.
3. Вашуков Ю. А., Демичев С. Ф., Еленев В. Д., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Хомич Ю. В., Ямщиков В. А. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 82.

4. Yolkin V. N., Malinskiy T. V., Khomich Yu. V., Yamschikov V. A. // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Vol. 11. № 3. P. 598.
5. Лямин Я. В. // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. 2010. Т. 12. С. 25.
6. Люшинский А. В. Специальные методы сварки. – М.: КНОРУС, 2020.
7. Tokarev V. N., Vasil'yeva N. V., Cheshev E. A., Bezotosnyi V. V., Khomich V. Yu., Mikolutskiy S. I. // Laser Physics. 2015. Vol. 25. P. 056003.
8. Бордаков П. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1999. Т. 2. С. 65.
9. Mikolutskiy S. I., Khomich Yu. V. // The Physics of Metals and Metallography. 2021. Vol. 122. № 2. P. 148.
10. Makarov G. N. // Phys. Usp. 2013. Vol. 56. P. 643.
11. Khomich V. Yu., Shmakov V. A. // Doklady Physics. 2012. Vol. 57. № 9. P. 349.
12. Luo F., Ong W., Guan Y., Li F., Sun S., Lim G. C., Hong M. // Applied Surface Science. 2015. Vol. 328. P. 405.
13. Khomich Yu. V., Mikolutskiy S. I. // Acta Astronautica. 2022. Vol. 194. P. 442.
14. Ёлкин В. Н., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Хасая Р. Р., Хомич Ю. В., Ямицков В. А. // ФХОМ. 2016. № 6. С. 5.
15. Seisyan R. P. // Tech. Phys. 2011. Vol. 56. P. 1061.
16. Li L., Hong M., Schmidt M., Zhong M., Malshe A., Huis B., Kovalenko V. // CIRP Ann. Manufacturing Technol. 2011. Vol. 60. P. 735.
17. Миколуцкий С. И., Хомич В. Ю., Ямицков В. А., Токарев В. Н., Шмаков В. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 548.
18. Khomich V. Yu., Shmakov V. A. // Doklady Physics. 2011. Vol. 56. № 6. P. 309.
19. Железнов Ю. А., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Хасая Р. Р., Хомич Ю. В., Ямицков В. А., Токарев В. Н. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 311.
20. Zheleznov Yu. A., Malinskiy T. V., Khomich Yu. V., Yamshchikov V. A. // Inorg. Mater.: Appl. Res. 2018. Vol. 9. № 3. P. 460.
21. Hattali M., Mesrati N., Tréheux D. // J. Eur. Ceram. Soc. 2012. Vol. 32. P. 717.
22. He Y., Zhang J., Li X. // Mater. Sci. Eng. A. 2014. Vol. 616. P. 107.

PACS: 79.20.Eb; 66.30.-h; 61.82.Bg

Improving the properties of metal-ceramic joints by means of laser pretreatment

V. Yu. Zheleznov¹, T. V. Malinskiy¹, S. I. Mikolutskiy^{1,2} and Yu. V. Khomich¹

¹ Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences
18 Dvortzovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: mikolserg@mail.ru

² Samara University
34 Moskovskoe shosse str., Samara, 443086, Russia

Received October 10, 2022

The possibility of using nanosecond laser pulses for perforation of elements of a diffusion-welded joint of the ceramic-metal-ceramic type has been studied. An improvement in the mechanical properties of compounds with elements pretreated by a repetitively pulsed Nd:YAG laser compared to untreated elements has been experimentally demonstrated. In particular, an increase in the tensile strength of the connection with treated elements up to 40 % and tensile strain up to 50 % are shown. Comparative studies of the distribution of strains in diffusion-welded joints with and without preliminary laser treatment were also carried out. The results obtained make it possible to reduce energy consumption for the diffusion welding process and improve the quality of joints of dissimilar materials in general.

Keywords: nanosecond pulses, laser perforation, metal-ceramic joints, copper interlayer, diffusion welding.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-6-584-592

REFERENCES

1. F. Fang, C. Zheng, H. Q. Lou and R. Z. Sui, *Mater. Let.* **47**, 178 (2001).
2. M. Brochu, M. D. Pugh and R. A. L. Drew, *Mater. Sci. Eng. A* **374**, 34 (2004).
3. Yu. A. Vashukov, S. F. Demichev, V. D. Elenev, T. V. Malinsky, S. I. Mikolutskiy, Yu. V. Khomich and V. A. Yamshchikov, *Applied Physics*, No. 1, 82 (2019) [in Russian].
4. V. N. Yolkin, T. V. Malinsky, Yu. V. Khomich and V. A. Yamshchikov, *Inorganic Materials: Applied Research* **11** (3), 598 (2020).
5. Ya. V. Lyamin, *Vestnik PGTU. Mashinostroenie, Materialovedenie* **12**, 25 (2010) [in Russian].
6. A. V. Lushinskiy, *Special methods of welding* (KNORUS, Moscow, 2020) [in Russian].
7. V. N. Tokarev, N. V. Vasil'yeva, E. A. Cheshev, V. V. Bezotosnyi, V. Yu. Khomich and S. I. Mikolutskiy, *Laser Physics* **25**, 056003 (2015).
8. P. Bordakov, *Problemy mashinostroenia i avtomatizatsii* **2**, 65 (1999) [in Russian].
9. S. I. Mikolutskiy and Yu. V. Khomich, *The Physics of Metals and Metallography* **122** (2), 148 (2021).
10. G. N. Makarov, *Phys. Usp.* **56**, 643 (2013).
11. V. Yu. Khomich and V. A. Shmakov, *Doklady Physics* **57** (9), 349 (2012).
12. F. Luo, W. Ong, Y. Guan, F. Li, S. Sun, G. C. Lim and M. Hong, *Applied Surface Science* **328**, 405 (2015).
13. Yu. V. Khomich and S. I. Mikolutskiy, *Acta Astronautica* **194**, 442 (2022).
14. V. N. Yolkin, T. V. Malinskiy, S. I. Mikolutskiy, R. R. Khasaya, Yu. V. Khomich and V. A. Yamshchikov, *Fizika i Khimia Obrabotki Materialov* **6**, 5 (2016) [in Russian].
15. R. P. Seisyan, *Tech. Phys.* **56**, 1061 (2011).
16. L. Li, M. Hong, M. Schmidt, M. Zhong, A. Malshe, B. Huis and V. Kovalenko, *CIRP Ann. Manufacturing Technol.* **60**, 735 (2011).
17. S. I. Mikolutskiy, V. Yu. Khomich, V. A. Yamshchikov, V. N. Tokarev and V. A. Shmakov, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (5), 548 (2013) [in Russian].
18. V. Yu. Khomich and V. A. Shmakov, *Doklady Physics* **56** (6), 309 (2011).
19. Yu. A. Zheleznov, T. V. Malinskiy, S. I. Mikolutskiy, R. R. Khasaya, Yu. V. Khomich, V. A. Yamshchikov and V. N. Tokarev, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (3), 311 (2014) [in Russian].
20. Yu. A. Zheleznov, T. V. Malinskiy, Yu. V. Khomich and V. A. Yamshchikov, *Inorg. Mater.: Appl. Res.* **9** (3), 460 (2018).
21. M. Hattali, N. Mesrati and D. Tréheux, *J. Eur. Ceram. Soc.* **32**, 717 (2012).
22. Y. He, J. Zhang and X. Li, *Mater. Sci. Eng. A* **616**, 107 (2014).