

УДК 539.4.016.3:669-1

УЛУЧШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИФФУЗИОННО-СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВОВ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Т. В. МАЛИНСКИЙ, С. И. МИКОЛУЦКИЙ, В. Е. РОГАЛИН, Ю. В. ХОМИЧ

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН

Санкт-Петербург, Россия

UDC 539.4.016.3:669-1

IMPROVEMENT OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF DIFFUSION-WELDED ALLOY JOINTS DUE TO PRELIMINARY LASER PROCESSING

T. V. MALINSKIY, S. I. MIKOLUTSKIY, V. E. ROGALIN, YU. V. KHOMICH

Аннотация. Исследовано влияние предварительной лазерной обработки поверхности сплавов наносекундными импульсами на механические свойства их диффузионно-сварных соединений. Показано улучшение предела прочности и относительного удлинения для соединения жаропрочного сплава на основе никеля, а также предела прочности для соединения хромированной бронзы и коррозионно-стойкой стали.

Ключевые слова: лазерная обработка, диффузионная сварка, механические свойства, соединение сплавов, хромированная бронза, наносекундные импульсы.

Abstract. The influence of preliminary laser surface treatment of alloys by nanosecond pulses on the mechanical properties of their diffusion-welded joints has been studied. An improvement in tensile strength and tensile strain has been shown for joining a nickel-based heat-resistant alloy, as well as an improvement in tensile strength for joining zirconium bronze and stainless steel.

Keywords: laser processing, diffusion welding, mechanical properties, alloy joining, zirconium bronze, nanosecond pulses.

Диффузионная сварка широко применяется в различных передовых отраслях промышленности, таких как авиационное машиностроение, аэрокосмические технологии, атомная энергетика, для изготовления сложных деталей и устройств, где требуется соединение разнородных материалов (металлов, сплавов, керамик). В последнее время наблюдается тенденция к повышению доли диффузионно-сварных соединений в общем объеме сварочных работ, поэтому актуальными задачами на сегодняшний день являются улучшение качества сварного шва и сокращение энергетических затрат при диффузионной сварке. Решение данных задач связано с развитием новых методов предварительной подготовки поверхностей свариваемых материалов, например, лазерной обработкой наносекундными импульсами [1, 2], которая представлена в работе.

Одним из возможных способов повышения прочности диффузионно-сварного соединения является формирование на свариваемых поверхностях структур микронного и субмикронного масштаба. Ранее для этого применялось нанесение покрытий [3, 4], использование наноструктурированных

металлических прослоек или тонких слоев порошкообразных материалов [5, 6], а также создание на свариваемых поверхностях упорядоченного рельефа за счет механической [7] или лазерной [8] обработки. В [8, 9] было продемонстрировано, что лазерное структурирование поверхности материалов с их последующей диффузионной сваркой может приводить к увеличению прочностных характеристик таких соединений. Помимо этого, преимуществами применения лазерного излучения для предварительной обработки материалов могут стать закаливание и повышение износостойкости материала, очистка исходной поверхности от примесей и загрязнений, увеличение прочности и устойчивости шва к окислению.

Цель работы – исследование влияния предварительной лазерной обработки поверхности наносекундными импульсами на механические свойства диффузионно-сварных соединений жаропрочного никелевого сплава ХН55МВЦ и нержавеющей стали 12Х18Н10Т с хромированной бронзой. Такие сплавы играют важную роль в авиационной, космической и атомной промышленности, как материал деталей газовых реактивных двигателей, в том числе турбин. Стоит отметить, что жаропрочные сплавы при комнатной температуре обычно очень твердые и хрупкие, их механическая обработка оказывается очень сложной и дорогой.

В качестве метода обработки поверхности использовалось прямое лазерное наноструктурирование [10, 11] на базе наносекундного NdYAG-лазера, генерирующего импульсно-периодическое излучение с длиной волны 355 нм. Достаточно короткая длина волны УФ-диапазона позволяет эффективно обрабатывать большое количество материалов, в частности, используемые в работе коррозионно-стойкие сплавы. Обрабатываемые образцы имели форму цилиндров диаметром 20 мм и высотой 15 мм. Чтобы исключить отрицательное влияние окисления поверхности при лазерном облучении, весь процесс обработки материалов производился в герметичной камере с возможностью напуска инертного газа под давлением в 1,5 атм.

Лазерная обработка производилась путем сканирования лазерным лучом по поверхности образца в прямом и обратном направлениях с шагом 10 мкм по горизонтали и 30 мкм по вертикали. Скорость сканирования составляла либо 1 мм/с, либо 0,5 мм/с, длительность импульсов была 10 нс, частота следования 100 Гц. Плотность энергии лазерного импульса варьировалась от 1 до 3 Дж/см². После лазерной обработки образцы (вместе с исходными необработанными для сравнительного исследования) помещали в герметичный контейнер, в котором производилась диффузионная сварка в условиях горячего изостатического прессования (ГИП) в газостате HIRP (Abra, Швейцария). После этого полученные соединения подвергались испытаниям на статическое растяжение при комнатной температуре на разрывной машине ИР 5143-200 (ООО «ЗИП», Россия).

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 1. Образцы из жаропрочного никелевого сплава обрабатывались при плотностях энергии 2 и 3 Дж/см², причем в каждом случае обе свариваемые поверхности, в отличие от соединения нержавеющей стали и хромированной бронзы.

Бронза и сталь обрабатывались при плотностях энергии в лазерном импульсе 1 и 2 Дж/см², причем был случай обработки только одного образца. Диффузионная сварка проводилась при давлении в 160 МПа, температурах 1160 °С и 1000 °С и времени выдержки около 3 ч.

Табл. 1. Механические свойства диффузионно-сварных соединений коррозионно-стойких сплавов с режимами лазерной обработки поверхности

Материал 1	Режим лазерной обработки, Дж/см ²	Материал 2	Режим лазерной обработки, Дж/см ²	Температура диффузионной сварки, °С	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
ХН55МВЦ	–	ХН55МВЦ	–	1160	567	42
ХН55МВЦ	2	ХН55МВЦ	2	1160	631	51
ХН55МВЦ	3	ХН55МВЦ	3	1160	633	51
ХН55МВЦ	–	ХН55МВЦ	–	1000	495	13
ХН55МВЦ	2	ХН55МВЦ	2	1000	640	34
ХН55МВЦ	3	ХН55МВЦ	3	1000	480	10,5
12Х18Н10Т	–	БрХ1	–	1160	245	–
12Х18Н10Т	2	БрХ1	–	1160	241	–
12Х18Н10Т	2	БрХ1	1	1160	258	–

Из табл. 1 видно, что при температуре диффузионной сварки в 1160 °С лазерная обработка при 2 Дж/см² приводит к увеличению предела прочности сварного соединения на 12 % по сравнению с необработанными образцами, причем повышение плотности энергии лазерного излучения до 3 Дж/см² не способствует какому-либо заметному увеличению предела прочности. Если же уменьшить температуру сварки до 1000 °С, то предел прочности у соединений с необработанными образцами и обработанными в режиме 3 Дж/см² оказывается гораздо ниже, чем в случае лазерной обработки при 2 Дж/см². Похожая тенденция, но более заметная в процентном соотношении, наблюдается при исследовании относительного удлинения диффузионно-сварных соединений ХН55МВЦ (см. табл. 1). Такой результат свидетельствует о возможности улучшения механических свойств сварных соединений жаропрочного никелевого сплава за счет предварительной лазерной обработки наносекундными импульсами, а также позволяет снизить температуру диффузионной сварки в условиях ГИП на 160 °С при сохранении механических характеристик сварного соединения.

В случае испытаний диффузионно-сварных соединений коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т и хромированной бронзы БрХ1 было получено незначительное улучшение предела прочности в случае обработки сразу двух поверхностей свариваемых образцов (см. табл. 1), когда как обработка при 2 Дж/см² только поверхности нержавеющей стали не привела к положительному результату.

Причиной улучшения механических свойств сварных соединений может стать появление низкотемпературной сверхпластичности [12, 13], способности

некоторых металлов с мелкозернистой структурой сильно деформироваться в определенном диапазоне температур в результате предварительной лазерной обработки поверхности. Например, в [13] жаропрочный сплав Инконель 718 при среднем размере зерен около 6 мкм достигает эффекта сверхпластичности при 980 °С, а при 0,3 мкм – демонстрирует эффект уже при 650 °С [14]. Помимо этого, в [15] показано, что зернограничная диффузия может на порядки превышать значения в объеме зерен. Таким образом, формирование поверхностных микро- и наноструктур может улучшить механические свойства соединения как за счет большей плотности границ зерен, приводящей к более активной диффузии в материале, так и в результате эффекта низкотемпературной сверхпластичности мелкозернистого материала.

Другой причиной улучшения механических свойств сварного соединения может являться более равномерное распределение степени деформации в соединениях с предварительной лазерной обработкой поверхности, приводящее к более эффективному диффузионному захлопыванию пор в зоне соединения. Исследование равномерности соединения образцов титанового сплава и нержавеющей стали, полученного сваркой давлением, проведено в [16], в которой была показана возможность делокализации деформации за счет изменения топографии поверхности прослойки.

В данной работе вследствие малой глубины проникновения лазерного излучения благодаря короткой длине волны происходит быстрый нагрев и последующее быстрое охлаждение тонкого приповерхностного слоя, что приводит к образованию поверхностных структур с характерным размером менее 100 нм. И, как уже было отмечено выше, это влечет за собой улучшение механических характеристик сварного соединения после предварительной лазерной обработки. Помимо этого, в [17] было показано, что меньшим плотностям энергии соответствует меньший характерный размер поверхностных структур. Это согласуется с данными табл. 1, согласно которым при температуре сварки в 1000 °С более прочное диффузионно-сварное соединение получается при 2 Дж/см². Таким образом, есть возможность эффективного влияния на механические свойства сварного соединения за счет оптимизации параметров облучения для конкретного материала.

В работе показана возможность улучшения механических свойств диффузионно-сварных соединений: увеличение предела прочности более 10 %, увеличение относительного удлинения более 20 %, после предварительной лазерной обработки свариваемой поверхности наносекундными импульсами УФ-диапазона. Также продемонстрирована возможность снижения температуры диффузионной сварки в условиях ГИП на 160 °С при сохранении прочностных характеристик сварного соединения.

Результаты исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (Проект № 0777-2020-0015 и Проект № 0057-2019-0005).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Миколуцкий, С. И.** Влияние лазерного УФ-излучения наносекундной длительности на структуру и адгезионные свойства металлов и сплавов / С. И. Миколуцкий, Ю. В. Хомич // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, № 2. – С. 159–165.
2. Лазерное травление германия / В. Ю. Железнов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т. 47, вып. 14. – С. 18–20.
3. Coating materials characteristics for plasma treatment of metals obtained through diffusion doping of powders based on austenite class steels / F. I. Pantsialeynka [et al.] // Key Engineering Materials. – 2019. – Vol. 843. – P. 141–146.
4. Формирование покрытий из самофлюсующегося порошка на основе сталей аустенитного класса с добавлением молибдена / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 2. – С. 95–100.
5. **Lutfullin, R.Ya.** Solid-phase joint formation in Ti–6Al–4V alloy under conditions of low temperature superplasticity / R.Ya. Lutfullin, M. Kh. Mukhametrakhimov // Rev.Adv.Mater.Sci. – 2010. – Vol. 25, № 2. – P.142–147.
6. **Люшинский, А. В.** Соединение деталей из жаропрочных сплавов диффузионной сваркой. Часть 1 / А. В. Люшинский // Сварочное производство. – 2016. – № 7. – С. 17–22.
7. **Пешков, В. В.** Влияние микроструктуры контактных поверхностей на образование соединения при диффузионной сварке титана / В. В. Пешков, А. Б. Булков, С. М. Ларсов // Вестн. ВГТУ. – 2017. – № 2. – С. 91–95.
8. **Ёлкин, В. Н.** Диффузионная сварка разнородных металлов в условиях горячего изостатического прессования / В. Н. Ёлкин, В. П. Гордо, В. В. Мелюков // Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та (ПНИПУ). Сер. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 68–72.
9. Лазерная обработка поверхности металлических сплавов для диффузионной сварки / Ю. А. Вашуков [и др.] // Прикладная физика. – 2019. – № 1. – С. 82–87.
10. Обработка поверхности титана наносекундным лазерным излучением / Ю. А. Железнов [и др.] // Письма о материалах. – 2014. – Т. 4, № 1. – С. 45–48.
11. Влияние облучения наносекундными лазерными импульсами на структуру поверхности металлических сплавов / В. Н. Ёлкин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – № 6. – С. 5–12.
12. Низкотемпературная сверхпластичность металлических материалов / Р. З. Валиев [и др.] // Докл. АН СССР. – 1988. – Т. 301, № 4. – С. 864–866.
13. **Mahoney, M. W.** Superplastic properties of alloy 718. Superalloy 718 / M. W. Mahoney // Metallurgy and Applications. Ed. Loria E.A. TMS. – 1989. – P. 391–405.
14. Formation of micro-, submicro- and nanocrystalline structures in nickel-base alloys / V. A. Valitov [et al.] // Proceedings of the First Joint International Conference «Recrystallisation and Grain Growth», Springer-Verlag. – 2001. – P. 563–568.
15. **Мухаметрахимов, М. Х.** Сварка давлением наноструктурных листов из титанового сплава Ti–6Al–4V в условиях низкотемпературной сверхпластичности / М. Х. Мухаметрахимов // Письма о материалах. – 2013. – Т. 3, № 4. – С. 276–279.
16. **Хазгалиев, Р. Г.** Твердофазное соединение титанового сплава с нержавеющей сталью через наноструктурированную прослойку из никелевого сплава / Р. Г. Хазгалиев, М. Х. Мухаметрахимов // Перспективные материалы. – 2011. – № 12. – С. 529–534.
17. **Хомич, В. Ю.** Образование периодических наноразмерных структур на поверхности твердых тел при фазовых и структурных превращениях / В. Ю. Хомич, В. А. Шмаков // Докл. Академии наук. – 2012. – Т. 446, № 3. – С. 276–278.