

УДК 621.791

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КАК МЕТОД ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ

*А. В. ЛЮШИНСКИЙ¹, В. Е. РОГАЛИН², Т. В. МАЛИНСКИЙ²,
Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО³*

¹ООО «Авиационно-космические технологии»

Москва, Россия

²Институт электрофизики и электроэнергетики РАН

Санкт-Петербург, Россия

³Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

UDC 621.791

LASER ELABORATION AS METHOD OF INTENSIFICATION OF DIFFUSION PROCESSES AT PRESSURE WELDING

A. V. LIUSHINSKII, V. E. ROGALIN, T. V. MALINSKII, F. I. PANTELEYENKO

Аннотация. Показано влияние плотности энергии лазерного излучения на формирование субмикронных структур на поверхностях, подлежащих диффузионной сварке. Установлено, что формирование диффузионно-сварного соединения через эти структуры отличается от формирования такого же соединения через микронеровности, полученные механической обработкой. Высказано предположение, что эти различия связаны с модификацией поверхности лазерным излучением.

Ключевые слова: диффузионная сварка, лазерная обработка, температура, сварочное давление, субмикронные структуры.

Abstract. The influence of laser radiant energy density on formation of submicron structures on the surfaces, which are subject to diffusion bonding, is demonstrated. It is established that the formation of diffusion-bonding join through these structures differs from the formation of the same join through the microroughnesses obtained by mechanical processing. A supposition is expressed that these differences are connected with a modification of the surface by the laser emission.

Keywords: diffusion welding, laser treatment, temperature, welding force, submicron structures.

Достижение необходимых физико-механических свойств соединений, получаемых диффузионной сваркой (ДС), возможно путем обеспечения диффузионного обмена между свариваемыми поверхностями и формирования достаточной диффузионной зоны [1, 2]. Для каждой пары материалов она будет оптимальной для обеспечения прочностных характеристик соединения.

Интенсификация ДС осуществляется варьированием параметрами процесса, либо использованием:

- применения промежуточных слоев (гальванических или напыленных [3], фольг, ультрадисперсных порошков [4]);
- воздействия в зоне сварки ультразвуковых колебаний [5] либо электростатического поля [6];
- предварительного формирования на свариваемых поверхностях упорядоченных структур при воздействии электронно-лучевым, ионно-плазменным или лазерным излучением [7].

В последние годы самым простым по технике исполнения и востребованным по достигаемым результатам является метод активации свариваемых поверхностей лазерным излучением, в частности, с учетом относительной дешевизны и доступности применяемого оборудования.

В [7–10] показано, что создание на свариваемых поверхностях рельефа определенной формы путем их лазерной обработки приводит к повышению прочностных свойств соединений из сталей 08X18H10T, 09X17H-Ш, титанового сплава типа 2В, никелевого сплава ХН55МВЦ, полученных диффузионной сваркой. Авторы этих работ исследуют влияние плотности энергии излучения и скорости сканирования лазерным лучом на формирование субмикронных структур, а также рассматривают источники лазерного излучения. При этом не установлена связь получаемых субмикронных структур с их пластической деформацией при ДС, а также ее роли в формировании физического контакта, активации и объемного взаимодействия. Не конкретизируется форма субмикронных структур, чтобы активация свариваемых поверхностей протекала с максимальной скоростью, интенсифицируя тем самым диффузионные процессы в зоне контакта.

Цель работы – исследование влияние вида и формы субмикронных структур на их ползучесть и формирование физического контакта в процессе ДС. Оценены эффекты, возникающие и сопутствующие процессу лазерной обработки. Они должны быть учтены при последующей ДС. Для достижения результата необходимо сравнить поверхностные структуры, подлежащие ДС, и полученные как механической, так и лазерной обработками.

В исследованиях использовали цилиндрические образцы диаметром 16 мм и высотой 25 мм из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Торцы образцов после токарной обработки имели параметр шероховатости $R_z = 1,2$ мкм. Лазерную обработку торцов проводили на лабораторной установке с плотностью энергии излучения $2,1 \text{ Дж/см}^2$ (режим 1), $3,2 \text{ Дж/см}^2$ (режим 2) и $4,3 \text{ Дж/см}^2$ (режим 3), диаметр пятна 220 мкм. Обработку свариваемых торцов осуществляли попарно по двум вариантам: сканирование лазерного луча в одном направлении и сканирование луча в двух взаимно перпендикулярных направлениях. После проведения лазерной обработки производили замер R_z и R_a каждого образца на аппарате «Профилограф – профилометр 252». Данные сведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения шероховатости поверхностей образцов после токарной и лазерной обработок

Номер образцов	Режим обработки	R_z , мкм (после токарной обработки)	R_z , мкм (после лазерной обработки)	R_a , мкм (после лазерной обработки)
1–1	Не обрабатывались	1,2	–	–
1–2		1,2	–	–
2–1	Режим 1	1,2	13,6	2,2
2–2		1,2	13,6	2,2
3–1	Режим 2	1,2	14,5	2,4
3–2		1,2	14,5	2,4
4–1	Режим 3	1,2	43,8	8,1
4–2		1,2	43,8	8,1
5–1	Режим 3 + обработка во взаимно перпендикулярном направлении	1,2	45,5	8,6
5–2		1,2	45,5	8,6

ДС образцов производили на специализированной установке СДВУ-50 с обеспечением вакуума не хуже $1,33 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Сборку образцов под сварку осуществляли только по поверхностям с одинаковым вариантом лазерной обработки. Предварительно сваривали пару «образец без лазерной обработки – контрольный образец». Параметры режима ДС: температура $T_{св} = 800$ °С, сварочное давление $P_{св} = 2$ кгс/мм², время выдержки $t = 15$ мин. Параметры выбраны исходя из того, что равнопрочное соединение ($\sigma_{св} \approx 55$ кгс/мм²) образцов из стали 12Х18Н10Т без дополнительной обработки после токарной операции ($R_z = 1,2$ мкм) получали при $T = 1000$ °С, $P = 2$ кгс/мм² и $t = 15$ мин [3].

Величину сварочного давления контролировали динамометрической скобой ДС-5, давление прилагали при достижении заданной температуры ДС. Нагрев образцов до температуры ДС и последующее охлаждение осуществляли со скоростью 20 °С/мин, что фиксировали термопарой ППР-1.

Фрактографические исследования проводили на РЭМ Tescan Vega 3. Свойства поверхностного слоя контактных поверхностей определяются структурой, шероховатостью, характеризуемой микрогеометрией, наличием остаточных напряжений, микротвердостью, наличием оксидов и др. [1, 2]. После механической обработки на поверхности, подлежащей ДС, появляется макроскопическая (волнистость) и микроскопическая (шероховатость) геометрическая неоднородность. Микровыступы в зависимости от чистоты обработки поверхности имеют высоту от 0,05 до 200 мкм. В большинстве случаев микровыступы в вертикальном сечении имеют форму треугольной пирамиды с различными значениями основания и радиуса закругления вершины.

Каждому виду механической обработки соответствует определенный

диапазон значений углов β , причем конкретному классу обработки поверхности соответствует определенное значение угла β . Профиль поверхностей стальных образцов, подвергнутых различной механической обработке, показывает, что повышение класса обработки поверхности приводит к уменьшению угла β [2].

Образование физического контакта при ДС в твердой фазе происходит, в первую очередь, в результате сближения соединяемых поверхностей, достигаемое путем пластической деформации микровыступов и приповерхностных слоев, сопровождаемой объемной деформацией металла [1, 2, 11]. Каждая поверхность представляет собой ансамбль микровыступов, имеющих различную высоту и форму, характерные для конкретного класса обработки. При деформации ансамбля микровыступов происходит непрерывное перераспределение контактных напряжений от точки к точке, т. к. по мере развития процесса в деформацию вовлекаются новые микровыступы и соответствующие им приповерхностные слои металла.

При ДС деформация микровыступов составляет величину порядка 70 %...80 % [1], причем деформация осуществляется при высоких температурах, когда активно протекают процессы миграции границ зерен, рекристаллизации, фазовых превращений и т. д., приводящие к изменению физико-механических свойств в макро- и микрообъемах.

Результаты экспериментальных исследований влияния геометрических параметров модельных микровыступов на ползучесть дали основания авторам [1, 2, 11] констатировать, что сглаживание микровыступов, сформированных механической обработкой, и образование физического контакта при диффузионной сварке будут происходить тем интенсивнее, чем меньше угол β . Исследования, проведенные в [11], показали, что прочность диффузионно-сварных соединений, поверхности которых предварительно обработаны лазерным излучением с различной плотностью энергии, повышается с увеличением высоты микровыступов и увеличением угла β .

Результаты показали, что на образце 1 следы от механической обработки практически не претерпели изменений под действием температуры и давления, они идентичны исходному состоянию. ДС образцов 2 и 3 происходила по микронеровностям, сформированным лазерным излучением (выплескам). Они, в основном, шарообразны, имеют небольшую высоту, хаотично разбросаны по поверхности и соединение происходило по наиболее высоким микронеровностям за счет их пластической деформации. С увеличением плотности энергии выброс из центральной части пятна усиливается, а глубина кратера и высота бруствера увеличиваются. Возвышения представляют собой микровыступы конусообразной формы с закругленными оплавленными вершинами. Резкое повышение прочности у образцов 4 и 5 вызвано тем, что микронеровности, сформированные лазерным излучением, имеют максимальную высоту, по сравнению с поверхностями других образцов,

и конусообразную форму, причем с минимальным углом у вершины, т. е. угол β в данном случае максимальный.

Первым признаком того, что между свариваемыми материалами началось объемное взаимодействие является наличие чашеобразного излома на поверхности образца после механических испытаний на прочность. Применительно к образцам 4 и 5 при большом увеличении видно, что на некоторых микровыступах имеются такие чашеобразные изломы (рис. 1).

Объяснение тому, почему интенсифицируется развитие физического контакта и активация объемного взаимодействия на микровыступах, сформированных лазерным излучением, заключается, по-видимому, в его многофакторном воздействии на обрабатываемую металлическую поверхность. Лазерное излучение позволяет создавать большие градиенты температур (быстрый нагрев тонкого поверхностного слоя металла до температур плавления и такое же быстрое охлаждение до комнатной температуры), которые способствуют образованию новых наноструктур с повышенной дефектностью. В кристаллической решетке повышается уровень напряжений, увеличивается плотность дислокаций. Происходит измельчение исходного зерна, тем самым облегчается пластическая деформация в ультрамелкозернистом материале. Коэффициент диффузии по границам зерен на порядки превышает соответствующие значения в объеме зерен [8–11]. Все это в итоге приводит к быстрому развитию объемного взаимодействия в диффузионной зоне.

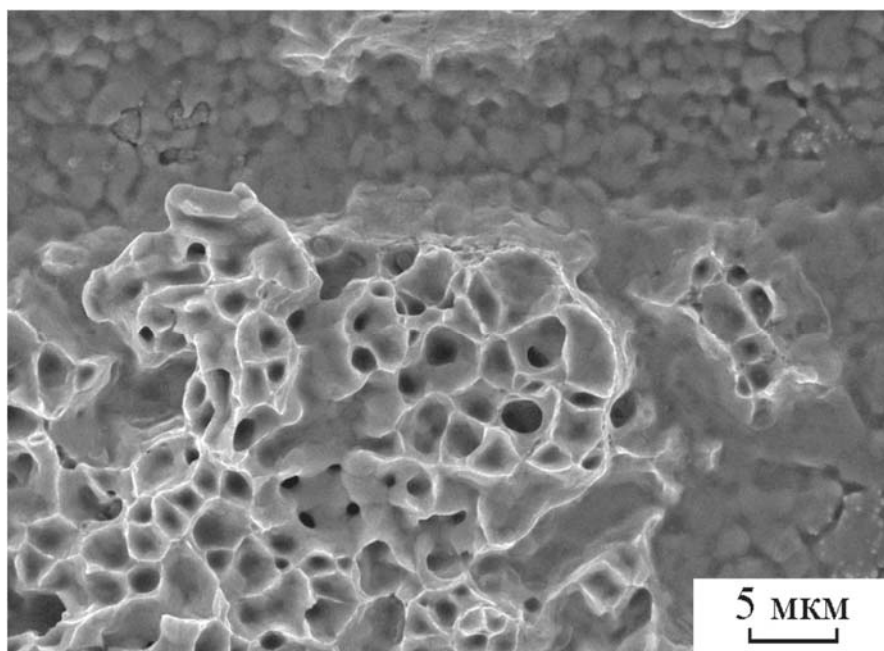


Рис. 1. Фрактограмма излома образца 5

Необходимо иметь в виду, что один и тот же режим лазерной обработки, примененный к поверхностям с различным уровнем шероховатости, может дать различную конечную величину R_z поверхностей, подлежащих ДС. А это, в свою

очередь, приведет к тому, что кинетика формирования физического контакта и возникновения активных центров будет отличаться при одних и тех же параметрах ДС. Кроме того, необходимо учитывать способность обрабатываемой поверхности повышать или понижать микротвердость под воздействием лазерного излучения, а также создавать дополнительный оксидный слой на поверхности.

Выводы.

1. Режим лазерной обработки поверхностей, подлежащих ДС, должен обеспечивать формирование микровыступов максимальной высоты и конусообразной формы.
2. Для выборов оптимальных режимов ДС необходимо учитывать процессы, происходящие с материалом под воздействием лазерного излучения, в частности, возможность подкалки участков плавления, неравномерность распределения величин микротвердости на микровыступах и во впадинах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красулин, Ю. Л.** О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии / Ю. Л. Красулин // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – № 1. – С. 89–97.
2. **Лариков, Л. Н.** Диффузионные процессы в твердой фазе / Л. Н. Лариков, В. Р. Рябов, В. М. Фальченко. – Москва: Машиностроение, 1975. – 192 с.
3. **Казаков, Н. Ф.** Диффузионная сварка материалов / Н. Ф. Казаков. – Москва: Машиностроение, 1976. – 312 с.
4. **Люшинский, А. В.** Диффузионная сварка разнородных материалов / А. В. Люшинский. – Москва: Академия, 2006. – 208 с.
5. **Конюшков, Г. В.** Специальные методы сварки давлением / Г. В. Конюшков, Р. А. Мусин. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2009. – 632 с.
6. Обработка поверхности титана наносекундным лазерным излучением / Ю. А. Железнов [и др.] // Письма о материалах. – 2014. – Т. 4, № 1. – С. 45–48.
7. 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.
8. Laser processing of metal alloys for diffusion welding / Yu. A. Vashukov [et al.] // Applied Physics. – 2019. – № 1. – P. 82.
9. Влияние предварительной лазерной обработки поверхности на механические свойства диффузионного сварного соединения железоникелевого сплава / В. Н. Ёлкин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2020. – № 3. – С. 40–47.
10. Изменение топографии поверхности бронзы при облучении сканирующим импульсным наносекундным лазерным излучением / В. Н. Ёлкин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2019. – № 1. – С. 27–34.
11. **Люшинский, А. В.** Влияние предварительной лазерной обработки поверхностей образцов стали 12X18H10T на их диффузионную сварку / А. В. Люшинский, В. Н. Петровский, В. Н. Ёлкин // Физика и химия обработки материалов. – 2021. – № 5. – С. 21–29.