УДК 669.716:621.785

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-10-245-18-20

*В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, Е. В. Кузьмин, В. П. Кулевич***ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ
СВАРЕННОГО ВЗРЫВОМ СКМ МЕДЬ М1 + АЛЮМИНИЙ АД1*****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: mv@vstu.ru

Исследовано влияние ультразвукового воздействия на диффузионные процессы в сваренном взрывом композите медь-алюминий при термообработке. Установлено, что ультразвуковые колебания приводят к интенсификации диффузионных процессов.

Ключевые слова: сварка взрывом, ультразвук, интерметаллиды системы Cu-Al, микротвердость.

*V. G. Shmorgun, O. V. Slautin, E. V. Kuzmin, V. P. Kulevich***INFLUENCE OF ULTRASONIC IMPACT ON DIFFUSION PROCESSES
DURING HEAT TREATMENT OF THE EXPLOSION WELDED
COPPER M1 + ALUMINUM AD1 COMPOSITE****Volgograd State Technical University**

The effect of ultrasonic action on diffusion processes in an explosion welded copper-aluminum composite during heat treatment has been investigated. It has been established that ultrasonic vibrations lead to intensification of diffusion processes.

Keywords: explosion welding, ultrasound, Cu-Al intermetallic compounds, microhardness.

Слоистые медно-алюминиевые композиты нашли широкое применение в различных отраслях промышленности [1]. Одним из наиболее распространенных и перспективных методов их получения является сварка взрывом (СВ) [1, 2] и комплексные технологии, включающие наряду со СВ последующую обработку давлением и термообработку (ТО), приводящие к формированию на межслойных границах диффузионных прослоек [3], которые могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на их свойства [4, 5, 6].

Известно, что ультразвуковое воздействие на кристаллы (эффективное лишь при превышении некоторого порога мощности акустических колебаний) сопровождается увеличением (на один – два порядка) плотности дислокаций и значений эффективных коэффициентов диффузии [7]. Рост эффективных коэффициентов диффузии наблюдается и в металлических сплавах. Так, например, при фиксированной температуре при ультразвуковом воздействии (в определенном интервале значений амплитуды подводимых акустических колебаний) коэффициент диффузии углерода в сталях увеличивается в 2–3 раза [8]. Следует ожидать, что

подобный эффект будет наблюдаться и при ТО сваренных взрывом слоистых композитов на их межслойных границах.

На основании изложенного целью работы явилось исследование влияния параметров термического и ультразвукового воздействия на скорость диффузионных процессов в сваренном взрывом биметалле М1 + АД1.

**Материалы и методы
исследований**

Сварку взрывом отоженных пластин меди М1 и алюминия АД1 толщинами 6 и 7 мм, соответственно, проводили по плоскопараллельной схеме на режиме ($V_k = 2100$ м/с, $V_c = 420$ м/с), обеспечивающем качественное соединение слоев с минимальным уровнем физической и химической микронеоднородности на межслойной границе.

Изготовленные биметаллические образцы делили на две группы: подвергаемые ультразвуковому воздействию при ТО и контрольные.

Подвергаемый ультразвуковому воздействию биметаллический образец помещали в печь SNOЛ 8,2/1100. Крепление образцов к волноводу проводилось как со стороны медного слоя, так и со стороны алюминиевого. Свободный

© Шморгун В. Г., Слаутин О. В., Кузьмин Е. В., Кулевич В. П., 2020.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0637-2020-0006.

конец волновода через технологическое отверстие в дверце печи надежно крепился к пьезокерамическому преобразователю, который устанавливался на лабораторном штативе непосредственно возле печи (рис. 1). Преобразователь подключался к генератору ультразвука УЗГИ-2 (Амплитуда – 5–7 мкм, мощность – до 2 кВт (200 Вт на пластину) частота – 20 кГц).

ТО биметалла М1 + АД1 проводилась при температурах, обеспечивающих твердофазное взаимодействие на межслойной границе (500 и 530 °С) в течение 5–90 мин при одновременном воздействии ультразвуковых колебаний в режиме резонанса. Рядом с испытуемыми, в печи располагали контрольные образцы, на которые воздействие УЗ не производилось.

Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – печь SNOL 8,2/1100; 2 – биметаллический образец (М1 + АД1); 3 – стальной волновод;
4 – пьезокерамический преобразователь; 5 – регулируемый штатив; 6 – генератор ультразвука УЗГ И-2

Металлографические исследования диффузионной зоны проводили на модульном моторизованном оптическом микроскопе Olympus BX61 с фиксацией изображения цифровой камерой DP-12. Рентгеноструктурный анализ выполняли на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE ESO. Расшифровку фазового состава осуществляли с помощью программного обеспечения к дифрактометру Diffrac.EVA (version 4.2.1).

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в образцах, подвергнутых ультразвуковым колебаниям через медный слой, рост диффузионной зоны наблюдается вплоть до 90 мин выдержки, после чего композиция расслаивается. При этом средняя толщина диффузионной зоны при ТО по режиму 530 °С, 90 мин составила ≈ 49 мкм, что больше толщины диффузионной зоны в образцах, не испытывающих ультразвуковых колебаний (≈ 37 мкм) (рис. 2). Воздействие ультразвука через алюминиевый слой приводит к расслоению биметалла уже через 10–15 мин. Такое изменение в поведении композиции может быть связано с природой распространения УЗ через границы различных сред [9].

Рис. 2. Кинетика роста диффузионной зоны при 500 (1, 2) и 530 °С (3, 4) в образцах, подвергнутых ультразвуковым колебаниям через прикрепленный медный слой (2, 4), и без воздействия (1, 3)

Воздействие ультразвука не оказывает влияния на фазовый состав диффузионной зоны. Она состоит из трех прослоек (рис. 3), соответствующих интерметаллидам Cu_9Al_4 , CuAl и CuAl_2 . Однако на всех образцах, подвергнутых ультразвуковому воздействию, в диффузионной зоне наблюдается большое количество трещин по границе интерметаллидов CuAl и CuAl_2 , которые приводят к расслаиванию композиции.

Рис. 3. Структура диффузионной зоны на границе медно-алюминиевого композита после ТО 530 °С, 90 мин с воздействием ультразвука и без

Анализ результатов термических испытаний медно-алюминиевых образцов под воздействием ультразвука показал, что рост диффузионной зоны подчиняется параболическому закону. Ультразвук способствует интенсификации диффузионных процессов на 30–40 % в сравнении с обычной ТО.

Предположительно, эффект ускорения диффузии связан с энергетическим вкладом от ультразвукового воздействия, способствующим движению точечных дефектов [10].

Выводы

1. Ультразвуковое воздействие на сваренный взрывом медно-алюминиевый композит при ТО способствует интенсификации диффузионных процессов на 30–40 %.

2. Длительное воздействие ультразвука на биметалл при ТО приводит к его расслаиванию по диффузионной зоне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Материаловедение и технология композиционных материалов : учебник. Доп. УМО вузов России по образованию в области металлургии / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев, Е. В. Кузнецов. – М., 2006. – 368 с.

2. Лысак, В. И. Сварка взрывом : монография / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М., 2005. – 544 с.

3. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия : монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – Москва, 2016. – 346 с.

4. Лариков, Л. Н. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке / Л. Н. Лариков, В. Р. Рябов, В. М. Фальченко. – М. : Машиностроение, 1975. – 192 с.

5. Диаграммы состояния двойных металлических систем / под общей редакцией Лякишева, т. 1. – Москва : Машиностроение, 1996. – 996 с.

6. Структура и механические свойства слоистых интерметаллидных композитов систем Cu-Al и Ti-Fe / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, В. Н. Арисова, С. А. Абраменко // Вопросы материаловедения. – 2007. – № 1. – С. 49–56.

7. Тяпунина, Н. А. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами / Н. А. Тяпунина, Е. К. Наими. – Москва : Изд-во МГУ, 1999. – 214 с.

8. Кулемин, А. М. Ультразвук и диффузия в металлах / А. М. Кулемин. – Москва : Металлургия, 1978. – 200 с.

9. Исакович, М. А. Общая акустика : учеб. пособие / М. А. Исакович ; И-во «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, Москва – 1973.

10. Олих, О. Я. Увеличение длины диффузии электронов в кристаллах p-кремния под действием ультразвука / О. Я. Олих, И. В. Островский // Физика твердого тела. – 2002. – Т. 44. – № 7. – С. 1198–1202.