УДК 669.716:621.785

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-18-23

В. Г. Шморгун, А. И. Богданов, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич, С. А. Кузнецов, Р. Д. Евчиц

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА КИНЕТИКУ РОСТА ДИФфуЗИОННОЙ ЗОНЫ
ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ БИМЕТАЛЛА НИКЕЛЬ-АЛЮМИНИЙ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Экспериментально показано, что воздействие ультразвука при термообработке сваренного взрывом биметалла никель НП2 + алюминий АД1 способствует сокращению латентного периода зарождения интерметаллидных прослоек $NiAl_3$ и Ni_2Al_3 на его межслойной границе, снижает температуру начала эвтектического превращения ($\sim$ на $10^\circ C$), при температуре интенсивной диффузии увеличивает толщину диффузионной зоны (на 30–40 %), не оказывая влияния на ее фазовый и химический состав.

Ключевые слова: система Al-Ni, сварка взрывом, термообработка, ультразвук, диффузионная зона, интерметаллиды.

© Шморгун В. Г., Богданов А. И., Слаутин О. В., Кулевич В. П., Кузнецов С. А., Евчиц Р. Д., 2021.

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

V. G. Shmorgun, A. I. Bogdanov, O. V. Slautin, V. P. Kulevich, S. A. Kuznecov, R. D. Evchits

INFLUENCE OF ULTRASOUND ON DIFFUSION ZONE GROWTH KINETICS DURING HEAT TREATMENT OF NICKEL-ALUMINUM BIMETAL

Volgograd State Technical University

It has been shown experimentally that the effect of ultrasound during heat treatment of the explosion-welded bimetal nickel NP2 + aluminum AD1 helps to reduce the latent nucleation period of NiAl_3 and Ni_2Al_3 intermetallic layers at its interlayer boundary, reduces the temperature of the onset of eutectic transformation ($\sim 10^\circ\text{C}$), at a temperature of intense diffusion increases the thickness diffusion zone (by 30-40%), without affecting its phase and chemical composition.

Keywords: Al-Ni system, explosion welding, heat treatment, ultrasound, diffusion zone, intermetallic compounds.

В работах [1, 2] показано, что диффузионная зона (ДЗ), формирующаяся в сваренном взрывом никель-алюминиевом композите состава АД1+ НП2 при твердофазной диффузии, состоит из двух интерметаллидных прослоек: со стороны никеля образуется алюминид Ni_2Al_3 , а со стороны алюминия – NiAl_3 . Микротвердость прослоек практически не зависит от температурно-временных режимов термообработки (ТО) и составляет, в среднем: 9,4 ГПа у Ni_2Al_3 и 6,5 ГПа – у NiAl_3 . Рост ДЗ происходит, в основном, за счет изменения толщины слоя никеля. Известно, что добиться увеличения интенсивности диффузионных процессов можно за счет ультразвукового воздействия [3, 4]. Однако, вопросы его влияния на кинетику диффузионного взаимодействия в зоне соединения алюминий-никель и фазовый состав образующихся диффузионных слоев до сих пор остаются не изученными. Целью настоящей работы являлось исследование влияния ультразвукового воздействия на кинетику роста ДЗ и ее фазовый состав при ТО сваренных взрывом слоистых композитов никель НП2 + алюминий АД1.

Материалы и методы исследований

Исследования проводили на композите состава никель НП2 + алюминий АД1 (2 + 5 мм).

Сварку осуществляли по плоскопараллельной схеме на режиме ($V_k = 1970$ м/с, $V_c = 380$ м/с), обеспечивающем качественное соединение слоев с минимальным уровнем физической и химической микронеоднородности на межслойной границе. ТО проводили при температурах 600, 620 и 630 $^\circ\text{C}$. Выбор температурного диапазона ТО был обусловлен необходимостью с одной стороны обеспечить в исследуемом временном диапазоне нагревов максимальную скорость диффузии, а с другой - ограничивался температурой эвтектического превращения в системе Al-Ni, которая, согласно диаграмме состояния [5, 6], составляет $\approx 640^\circ\text{C}$. Воздействие ультразвука на образец осуществляли через слой никеля НП2.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. К генератору ультразвука УЗГИ-2 был подключен пьезоэлектрический преобразователь в составе составного ступенчато-конического концентратора ультразвуковых колебаний, к которому присоединялся металлический волновод. Входная мощность генератора, замеренная в процессе его работы, составила ~ 18 Вт. Частота колебаний, подаваемая генератором на пьезоэлектрический преобразователь и замеренная с помощью частотомера ЧЗ-34А, составила 20,5 кГц, а амплитуда – 5–7 мкм.

Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – печь SNOL 8,2/1100; 2 – биметаллический образец; 3 – стальной волновод; 4 – составной ступенчато-конический концентратор ультразвуковых колебаний с пьезокерамическим преобразователем; 5 – регулируемый штатив; 6 – генератор ультразвука УЗГИ-2

Концентратор ультразвуковых колебаний с закрепленным на нем волноводом устанавливался на лабораторном штативе непосредственно возле печи (рис. 1). Подвергаемый ультразвуковому воздействию биметаллический образец помещали в печь SNOL 8,2/1100. Образец надежно соединялся со свободным концом волновода.

ТО биметаллов проводилась при температурах, обеспечивающих твердофазное взаимодействие на межслойной границе, в течение 5–90 мин при одновременном воздействии ультразвуковых колебаний в режиме резонанса. Рядом с испытуемыми в печи располагали контрольные образцы, на которые воздействие ультразвука не производилось.

Металлографические исследования выполняли на модульном металлографическом микроскопе Olympus BX-61. Электроннооптические исследования и определение химического состава осуществляли на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D Dual Beam. Рентгеноструктурный анализ выполняли на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE ECO

в геометрии Брегга–Брентано при нормальных условиях в излучении медного анода ($\lambda=1,5406\text{\AA}$) с использованием никелевого K_{β} -фильтра. Образцы исследовали на отражение, интенсивность дифракционной картины регистрировали с помощью позиционно-чувствительного детектора SSD160 линейного типа с числом каналов 160. Фазы идентифицировали с использованием порошковой базы ICDD PDF-2 (2016). Рентгеновскую съемку осуществляли с поверхности алюминия после его травли раствором едкого натра NaOH. Расшифровку фазового состава осуществляли с помощью программного обеспечения к дифрактометру Diffrac.EVA (version 4.2.1).

Результаты и их обсуждение

Металлографические исследования показали, что повышение температуры и времени нагревов при достижении диффундирующими элементами концентраций, соответствующих пределу растворимости при данной температуре, приводит к зарождению и росту на границе NiP2-AD1 интерметаллидных фаз (рис. 2).

Рис. 2. Структура ДЗ после ТО 620 °С (а, б) и 630 °С (в, г), 60 мин без (а, в) и с ультразвуковым воздействием (б, г) ($\times 200$)

Формирование ДЗ начинается с образования локальных участков, которые с повышением температуры и времени нагревов увеличиваются в размерах и срастаются в одну сплошную прослойку. Длительность взаимодействия до появления зародышей интерметаллидных фаз (в соответствии с диаграммой состояния ими могут быть NiAl , Ni_2Al_3 , Ni_3Al , NiAl_3 , Ni_5Al_3) после ТО с воздействием ультразвука незначительно снижается. Так, например, при температуре 620°C латентный период с ультразвуковым воздействием и без него составляет 41 и 46 с, соответственно. Таким образом, воздействие ультразвука на композицию способствует снижению латентного периода.

Количественные результаты опытов представлены на рис. 3, из которых следует, что, независимо от наличия или отсутствия ультразвукового воздействия, температурно-временная зависимость периода до образования зародышей интерметаллидной фазы подчиняется экспоненциальному закону, характерному для взаимной концентрационной диффузии.

Рис. 3. Температурно-временные условия зарождения интерметаллидной прослойки в биметалле никель НП2 + алюминий АД1 после сварки взрывом

Установлено, что, как и при обычном печном нагреве, ДЗ после ТО с ультразвуковым воздействием включает в себя две прослойки. С увеличением температуры и времени выдержки прослойки со стороны никеля и стороны алюминия растут по толщине и протяженности. Причем интенсивность их роста определяется, в основном, температурой нагрева, а зависимость их суммарной толщины от времени выдержки подчиняется параболическому закону (рис. 4). Воздействие ультразвука при ТО в интервале $600\text{--}620^\circ\text{C}$ не оказывает заметного влияния на толщину ДЗ. Так, например, средняя суммарная толщина ДЗ при ТО по режиму 620°C , 60 мин без ультразвукового воздействия составила ≈ 49 мкм, в то время как в образцах, не испытывающих ультразвукового воздействия, этот же параметр составил ≈ 37 мкм (рис. 4).

Воздействие ультразвука на образцы при 630°C сопровождается увеличением толщины ДЗ с ~ 100 мкм до ~ 140 мкм и изменением ее структуры на характерную для взаимодействия в присутствии жидкой фазы (рис. 1, 2). При этом толщина прослойки со стороны никелевого слоя, оказалась практически одинаковой. Наблюдаемые изменения в структуре прослойки со стороны алюминия связаны со снижением температуры эвтектического превращения в системе Ni-Al за счет дополнительного энергетического вклада от ультразвуковых колебаний, способствующих движению точечных дефектов [7, 8].

Исследование влияния ультразвукового воздействия на микротвердость прослоек показало, что она практически не изменяется (рис. 5).

Рис. 4. Изменение толщины ДЗ в зависимости от времени ТО при температурах 600°C (1, 1'), 620°C (2, 2') и 630°C (3, 3') без (1, 2, 3) и с ультразвуковым воздействием (1', 2', 3')

Рис. 5. Влияние ультразвукового воздействия и режима ТО на микротвердость прослойки со стороны никеля (1) и со стороны алюминия (2). Время ТО 60 мин

Для определения химического и фазового состава ДЗ проводили исследования, включающие ЭДС и рентгенофазовый анализ.

На рис. 6 приведены полученные при точечном ЭДС анализе характерные эмиссионные

спектры, а в таблице – результаты их расчета. Видно, что прослойка со стороны никеля (точки 1, 3) содержит в среднем 40 ат. % Al и 60 ат. % Ni, а прослойка со стороны алюминия (точки 2, 4) – 25 ат. % Al и 75 ат. % Ni.

Результаты точечного ЭДС анализа состава ДЗ

Точка анализа (см. рис. 6)	Содержание элемента, ат. %		Предполагаемая фаза
	Алюминий	Никель	
1	60,72	39,28	Ni_2Al_3
2	74,69	25,31	NiAl_3
3	60,31	39,69	Ni_2Al_3
4	74,78	25,22	NiAl_3

а

б

в

г

Рис. 6. СЭМ изображения ДЗ после ТО 620 °С, 60 мин с воздействием ультразвука (а) и без (б), а также эмиссионные спектры, характерные для прослойки со стороны никеля (в) и прослойки со стороны алюминия (г)

Замер на полученных дифрактограммах ДЗ (рис. 7) углов и интенсивности линий, а также расчет межплоскостных расстояний и их сравнение с данными базы Powder Diffraction File-2, позволили установить наличие фаз NiAl_3 и Ni_2Al_3 .

Рис. 7. Дифрактограммы ДЗ:
а – с воздействием ультразвука, б – без воздействия ультразвука

Вывод

Воздействие ультразвука при термообработке способствует сокращению латентного периода зарождения интерметаллидных фаз на межслойной границе сваренного взрывом композита никель НП2 + алюминий АД1, а также приводит к снижению температуры начала эвтектического превращения (~ на 10 °С). При фиксированной температуре интенсивной диффузии суммарная толщина диффузионной зоны увеличивается на 30–40 %, а ее фазовый и химический состав остается неизменным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shmorgun, V. G., Bogdanov, A. I., Arisova, V. N., Trykov, Yu. P. Growth kinetics of the diffusion zone at the interface of the explosion-welded nickel–aluminium composite (2016) *Welding International*, 30 (8), pp. 625-629.

При сопоставлении полученных данных выявлено, что прослойка со стороны никеля – это фаза Ni_2Al_3 , а со стороны алюминия – NiAl_3 . Таким образом, ультразвуковое воздействие не оказывает влияния на химический и фазовый состав ДЗ.

2. Shmorgun, V. G., Trykov, Yu. P., Slautin, O. V., Metelkin, V. V., Bogdanov, A. I. The kinetics of diffusion processes in the nickel-aluminum composition (2009) *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 50 (3), pp. 286-289.
3. Тяпунина, Н. А. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами / Н. А. Тяпунина, Е. К. Наими. – Москва : Изд-во МГУ, 1999. – 214 с.
4. Кулемин, А. М. Ультразвук и диффузия в металлах / А. М. Кулемин. – Москва : Металлургия, 1978. – 200 с.
5. Диаграммы состояния двойных металлических систем в 3 т. Т. 1. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – Москва : Машиностроение, 1996. – 992 с.
6. Okamoto, H. Al-Ni (Aluminum-Nickel) / H. Okamoto // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. – 2004. – Volume 25. – № 4. – P. 394.
7. Олих, О. Я. Увеличение длины диффузии электронов в кристаллах р-кремния под действием ультразвука / О. Я. Олих, И. В. Островский // *Физика твердого тела*. – 2002. – Т. 44. – № 7. – С. 1198-1202.
8. Исакович, М. А. Общая акустика : учеб. пособие / М. А. Исакович. – М. : Изд-во «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1973.