

- техника и технология его изготовления и применения. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2012. – Вып. 15. С. 533–541.
9. Пат. 87020 С2 Украина, МПК (2009). В28D 1/00, Спосіб обробки поверхонь обертання з каменю / В.І. Сидорко, В.В. Пегловський, В.Н. Ляхов, О.М. Поталико. – Заявл. 26.07.2007; Опубл. 10.06.09, Бюл. № 11.
 10. Пат. 15655 Украина, МКПО 10 – 01. Часы / В. И. Сидорко, В. Н. Ляхов, В.В. Пегловский, Е. М. Поталыко. – Заявл. 25.06.07; Опубл. 10.01.08, Бюл. № 1.
 11. Пат. 15656 Украина, МКПО 10–01. Набор письменный «Сектор» / В.И.Сидорко, В.Н. Ляхов, В.В. Пегловский, Е.М. Поталыко. – Заявл. 25.06.07; Опубл. 10.01.08, Бюл. № 1.
Поступила 10.04.14

УДК669.187.2

**Г. М. Григоренко, Л. И. Адеева, А. Ю. Туник, В. И. Зеленин, Е. В. Зеленин,
М. А. Полещук¹, В. А. Лукаш²**

¹*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев,*

²*Институт сверхтвердых материалов им. В. М. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ (Ni-Cu, Al-Fe) РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СТП ВНАХЛЕСТ

Приведены результаты исследования структуры и свойств биметаллических соединений разнородных металлов, полученных способом сварки трением с перемешиванием (СТП). Сварка трением с перемешиванием (СТП) выполнялась с помощью инструмента из карбо-нитрида-бора. При СТП, частота вращения инструмента составляла 1250 об/мин, а скорость перемещения инструмента 40–60 мм/мин. Исследованы системы с неограниченной растворимостью (Ni–Cu) и ее отсутствием (Al–Fe) в твердом состоянии. В результате СТП меди с никелем получено качественное со взаимным проникновением одного металла в другой на глубину примерно 3 мм.

Результаты проведенных исследований структуры и фазового состава позволяют рекомендовать способ СТП для получения биметаллических соединений из металлов, как с неограниченной растворимостью, так и без нее в твердом состоянии.

Ключевые слова: *сварка трением, перемешивание, биметаллическое соединение.*

Сварка трением с перемешиванием (СТП) является одним из новейших способов соединения металлов и сплавов [1], и представляет разновидностью сварки давлением – сварное соединение образуется в результате совместного пластического деформирования соединяемых деталей в твердой фазе[2; 3].

Преимущества СТП по сравнению с другими способами при получении неразъемных соединений очевидны, это[4; 5]: сохранение свойств металла в зоне сварки; отсутствие вредных испарений и ультрафиолетового излучения; снижением количества горячих трещин и пористости в металле швов; отсутствие необходимости в применении присадочного материала и защитного газа. В настоящее время большой интерес представляет возможность применения способа СТП для соединений разнородных металлов.

Как показано в работах [6–11], решающее влияние на свариваемость разнородных металлов оказывает металлургическая совместимость, определяемая взаимной растворимостью соединяемых металлов как в жидком, так и в твердом состояниях, а также образованием хрупких химических соединений – интерметаллидов.

Поскольку формирование шва происходит вблизи температур рекристаллизации, в металле шва отсутствуют значительные напряжения. Кроме того, за счет измельчения структуры возрастают показатели механических свойств. При этом не происходят изменение химического состава, а также выгорание элементов, порообразование и другие нежелательные процессы.

В настоящей работе способом СТП получены и исследованы два вида сварных соединений системы Ni–Cu, элементы которой отличаются неограниченной растворимостью, а также системы Al–Fe с отсутствием растворимости соединяемых материалов в твердом состоянии.

Режимы процесса СТП и характеристики свариваемых материалов даны в табл.

Режимы СТП и характеристики свариваемых материалов

Марка материала	Тип биметаллического соединения	Толщина пластины, мм	Глубина внедрения инструмента.	Режим сваривания	
				Скорость сварки, мм/мин	Скорость вращения -инструмента, об/мин
Н1/М0	Ni/Cu	4/10	4,5	40	1250
АМг6/008ЖР	Al/Fe	5/3	6,0	60	1250

Примечание: В числителе указаны характеристики верхнего слоя, в знаменателе нижнего.

Сваривание осуществлялось инструментом специальной формы, изготовленным из кубического нитрида бора (кубонит) с диаметром бурта (заплечика) 25 мм и высотой штыря 6 мм.

В процессе исследований применяли методику, включающую металлографию, исследование структуры с применением сканирующего электронного микроскопа (СЕМ) JSM-35 CF фирмы JEOL (Япония), с определением элементного состава методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА).

Исследовали микроструктуры поперечного и продольного сечений сварных соединений, полученных способом СТП.

Изучали явления массопереноса в результате механического перемешивания металлов, диффузию элементов и условия образования интерметаллидных фаз, определяли их состав и микротвердость.

Медь и никель – два металла, образующие непрерывный ряд твердых растворов и отвечающие необходимым условиям для получения сварного соединения разнородных металлов, они относятся к смежным группам периодической системы элементов (атомные радиусы отличаются менее чем на 10–15%) и не образуют хрупких интерметаллидных соединений.

Однако медь и никель отличаются разными физико-механическими характеристиками. Медь – мягкий, пластичный материал с высокой электропроводимостью, который плавится при температуре 1085 °С, в то время как никель является относительно твердым, устойчивым к коррозии металлом, плавящимся при 1455 °С.

Биметаллическое соединение Ni/Cu с неограниченной растворимостью элементов друг в друге получено при использовании концентрированного термомеханического действия пин-инструмента. В качестве верхнего слоя использован никелевый сплав марки Н1 толщиной 4 мм с микротвердостью (2880±170) МПа, а в качестве нижнего слоя – медь толщиной 40 мм марки М0 с микротвердостью (1160±80) МПа.

Были исследованы металлографические шлифы сварных соединений в поперечном и продольном сечении.

При исследовании сварного соединения в зоне соединения никеля и меди происходит взаимное проникновение этих металлов на глубину до 3 мм. Механическое перемешивание металлов наблюдали в виде взаимопроникающих чередующихся полос, направленных в сторону движения пин-инструмента. Полосы из меди и никеля имеют разную толщину

(соответственно 0,3–0,6 и 0,03–0,30 мм). Вследствие перекристаллизации в этих полосах происходит измельчение структуры. В меди размер зерна колеблется от 5 до 20, а в никеле – от 5 до 40 мкм. Микротвердость полос никеля составляет (1270±40), а меди – (1140±50) МПа.

Над участком перемешивания в никеле находится участок термомеханического влияния протяженностью 3 мм с мелким зерном 20–70 мкм и полосами деформации.

Краевой участок никеля – зона термического влияния, находящаяся выше зоны термомеханического влияния, – имеет более крупное зерно.

В меди под участком перемешивания металлов обнаружен участок перекристаллизации шириной до 0,6 мкм с мелким зерном размером 15–20 мкм и участок термомеханического влияния шириной до 0,1 мм со слегка деформированным зерном, переходящим в основной металл. В обоих этих участках зафиксированы включения никеля в виде вытянутых (веретенообразных) фрагментов с микротвердостью (1300±170) МПа.

Методом РСМА изучен химический состав зоны контакта двух металлов. Установлено, что по границам зерен никеля происходит диффузия меди в никель, при этом их микротвердость понижается (1100±60) МПа.

Возможность соединения металлов, нерастворимых друг в друге в твердом состоянии способом СТП, изучена на примере соединений Fe с Al. Препятствием к получению сварных соединений алюминия и его сплавов с железом является химическое взаимодействие этих металлов, приводящее к необратимому образованию интерметаллидов по зоне контакта двух металлов[19–20].

В системе Fe–Al образуются твердые растворы, интерметаллические соединения и эвтектики.

В работе был подвергнут СТП внахлест алюминиевый сплав АМг-6 с армко-железом (008ЖР). Толщина пластин алюминиевого сплава и железа составила 5 и 3 мм, а их микротвердость – соответственно (552±23) и (1260±60) МПа. Пин-инструмент воздействовал через алюминиевый сплав на глубину 6 мм. При СТП этих металлов в поперечном сечении зоны происходит клинообразное внедрение железа на глубину 2 мм с двух сторон от центра шва. Структура шва неоднородная, состоящая из трех зон. Шов образовался прежде всего в результате массопереноса алюминия, поскольку все зоны, по данным РСМА, имеют алюминиевую матрицу. В верхней части расположена зона со структурой на основе алюминия и включениями интерметаллидов FeAl₃ и Fe₂Al₇ (содержание алюминия соответственно 59 и 63 мас. %). Микротвердость этой зоны составляет 980–1168 МПа.

Средняя часть шва отличается наибольшей неоднородностью. В алюминиевой матрице расположены продолговатые частицы железа разного размера и скопления интерметаллидов Fe₂Al₇ и FeAl₂. В продолговатых частицах железа диффузия алюминия не обнаружена, но твердость их повышена (1360–2740 МПа), очевидно, в результате деформации при массопереносе. Интерметаллид FeAl₂ с содержанием 49 мас. % алюминия находится в непосредственной близости, образуя окантовку частиц железа, а алюминид Fe₂Al₇ хаотично расположен в алюминиевой матрице, повышая ее микротвердость до 1260–1930 МПа.

В зоне шва, непосредственно контактирующей с железом, основной структурной составляющей являются алюминиды Fe₂Al₇ и FeAl₂, которые образуют языкообразные внедрения в структуру железа. Алюминиды железа расположены в алюминиевой матрице, поэтому микротвердость этой структуры невелика – 2340–3220 МПа в сравнении с микротвердостью самих интерметаллидов (около 10000 МПа). В структуре ядра обнаружена микропористость, очевидно, обусловленная образованием интерметаллидных фаз (рис. 10, табл. 4). По данным РСМА в алюминиевом сплаве и в железе на расстоянии 10–15 мкм от ядра взаимодиффузия элементов не зафиксирована.

В результате исследования сварного соединения алюминиевого сплава с железом при воздействии пин-инструмента через алюминий установлено, что в процессе СТП происходит перемещение металлов – прежде всего массоперенос алюминия, и последующее образование соединений FeAl₃, Fe₂Al₇, FeAl₂. Повышенное содержание кислорода в местах скопления

интерметаллидов, очевидно, свидетельствует о том, что одновременно с их формированием образуется небольшое количество оксидов.

Выводы

1. В результате СТП Ni с Cu получено качественное биметаллическое соединение со взаимным проникновением одного металла в другой на глубину примерно 3 мм. Вследствие прохождения процессов перекристаллизации в полосах механического перемешивания металлов происходит измельчение структуры. Участки никеля, непосредственно контактирующие с медью, имеют пониженную микротвердость – (1100 ± 60) МПа и сильнее подвергаются травлению, что объясняется взаимодиффузией меди и никеля по границам зерен с образованием прослоек твердого раствора этих металлов. Ведущую роль в процессе СТП играет перемешивание в пластическом состоянии металлов, в меньшей степени – их взаимодиффузия.

2. В результате СТП Al с Fe образовалась зона соединения значительного объема с проникновением алюминия в железо на глубину до 2,5 мм. При

этом происходит взаимодействие металлов – массоперенос прежде всего алюминия и последующее образование соединений FeAl₃, Fe₂Al₇, FeAl₂. Наиболее твердые участки зоны соединения (2340 ± 3220 МПа) состоят из интерметаллидов, расположенных в алюминиевой матрице, поэтому микротвердость этой структуры невелика, в сравнении с микротвердостью самих интерметаллидов.

3. Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать способ СТП для получения биметаллических материалов из металлов как с неограниченной растворимостью, так и не растворимых в твердом состоянии.

Наведено результати дослідження структури і властивостей біметалевих з'єднань різнорідних металів, отриманих способом зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП). Зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) виконувалася за допомогою інструменту з карбо-нітриду-бору. При ЗТП, частота обертання інструменту становила 1250 об/хв, а швидкість переміщення інструменту 40–60 мм / хв. Досліджено системи з необмеженою розчинністю (Ni–Cu) та її відсутністю (Al–Fe) у твердому стані. В результаті СТП міді з нікелем отримано якісне біметалічне з'єднання з взаємним проникненням одного металу в інший на глибину приблизно 3 мм.

Результати проведених досліджень структури і фазового складу дозволяють рекомендувати спосіб СТП для отримання біметалевих з'єднань з металів, як з необмеженою розчинністю, так і без неї в твердому стані.

Ключові слова: зварювання тертям, перемішування, біметалічне з'єднання.

Abstract. Given are the results of investigation of structure and properties of bimetal joints of dissimilar metals, produced by friction stir welding (FSW) method. Friction stir welding (FSW) was carried out using carbo-boron nitride tool. Frequency of tool rotation in FSW made 1250 rev/min and rate of tool movement was 40–60 mm/min. Studied are the systems with unrestricted solubility (Ni–Cu) and without it (Al–Fe) in solid state. Quality FSW bimetal copper-nickel joint with interpenetration of one metal into another approximately at 3 mm depth was received. The results of carried investigations of structure and phase composition allow recommending FSW method for producing of bimetal joints of metals with unrestricted solubility as well as without it in solid state.

Key words: friction stir, welding, bimetal joints.

Литература

1. Pat. 9125978.8 J.B., МПКРСТrGB92. Friction stir butt welding / W.M. Thomas. – Publ. 01.12.91.
2. Вилль В.И. Сварка трением металлов. – Л.: Машиностроение, 1970. – 176 с.
3. Сварка трением: Справочник/ В.К. Лебедев, И.А. Черненко, Р. Михальски и др. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 236 с.

4. Okamura H., Aota K., Ezumi M. Friction stir welding of aluminum alloy and application to structure // J. of Jap. Institute of Light Metals. – 2000. – 50, №4. – P. 166–172.
5. Arbegast W.J. Friction stir welding. After a decade of development // Welding J. – 2006. – 85, №3. – P. 28–35.
6. Watanabe H., Takayama H., Yanagisawa A. Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding // J. of materials proc. technology. – 2006. – 178. – P. 342–349.
7. Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy / T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino et al. // Materials Sci. and Engineering. – 2007. – A456. – P. 344–349.
8. Interfacial reaction in steel-aluminum joints made by friction stir welding / W.-B. Lee, M. Schmuecker, U.A. Mercardo et al. // Scripta Mater. – 2006. – 55. – P. 35–358.
9. Microstructure of friction stir welding of aluminium alloy to magnesium alloy / A. Kosta, R.S. Coelho, J. dos Santos, A.R. Pyzallac // Ibid. – 2000. – 66. – P. 953–956.
10. Kwon Y.J., Shigematsu I., Saito N. Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminium alloys // Materials Letters. – 2008. – 62. – P. 3827–3829.
11. Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al—Cu joints / P. Xue, D.R. Ni, D. Wang et al. // Materials Sci. and Engineering. – 2011. – 528. – P. 4683–4689.

Поступила 10.07.14

УДК 621.921:547.639

**В. С. Гаврилова¹; Е. А. Пашенко, д-р. техн. наук¹;
В. И. Штомпель, д-р. хим. наук²; А. М. Кошкин¹; А. Г. Довгань¹**

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

²Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины, г. Киев

ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И МАТЕРИАЛОВ СУБСТРАТА НА СТРУКТУРУ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ ЭПОКСИДНО-ПОЛИСИЛОКСАНОВОГО КОМПОЗИТА

Представлены результаты рентгеноструктурных исследований эпоксидно-полисилоксанового композита, модифицированного нанодисперсным оксидом кремния и высокодисперсным углеродным наполнителем в исходном состоянии, на поверхности стали 45 и титанового сплава ВТ1-0. Показано, что химические связи образуются между полярными группами полимерной матрицы и атомами кислорода на поверхности пластин из титанового сплава, тогда как при нанесении композита на сталь химического взаимодействия между ними не происходит

Ключевые слова: эпоксидно-полисилоксановый композит, аморфная структура, аморфно-кристаллическая структура, микрогетерогенная структура, малоугловое и широкоугловое рассеяние рентгеновских лучей.

Введение

Актуальной проблемой триботехнического материаловедения эпоксидных композиционных материалов является поиск наполнителей и разработка способов их введения в полимерную матрицу для улучшения эксплуатационных свойств полимерных покрытий в зависимости от условий работы пар трения. В свою очередь, эксплуатационные свойства зависят от физико-химических характеристик полимера, которые определяются