

References

1. Tretyakov V. I. (1976). *Osnovy metallovedenia i tehnologii spechennykh tverdykh splavov [Bases of metal science and technology of production of sintered hard alloys]*. Moscow: Metallurgy [in Russian].
2. Falkovsky V. A., & Kliachko L. I. (2005) *Tverdye splavy [Solid alloys]*. Moscow: Ruda and metals [in Russian].
3. Kieffer R., & Schwarzkopf P. V. (1957) *Tverdye splavy [Solid alloys]*. Moscow: Metallurgizdat [in Russian].
4. Panov V. S., Chuvilin A. M., Falkovsky V. A. (2004) *Technologia spechennykh tverdykh splavov i izdelii iz nikh [Technology and properties of sintered hard alloys and their products]*. Moscow: MISiS [in Russian].

УДК 621.791.582

Г. М. Григоренко, д-р техн. наук¹; **М. А. Полещук**¹, канд. техн. наук; **Л. И. Адеева**¹, **А. Ю. Туник**¹, **В. И. Зеленин**¹, **В. И. Лукаш**², кандидаты технических наук; **Е. В. Зеленин**¹, **С. Д. Заболотный**², **Ю. А. Никитюк**², инженеры

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича 11, 03150 г. Киев, Украина, e-mail: office@paton.kiev.ua

²Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, ул. Автозаводская 2, 04074 г. Киев, e-mail: lukva@ism.kiev.ua

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛОВ, СВАРЕННЫХ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Исследованы структуры и свойства биметаллических соединений разнородных металлов, полученных сваркой трением с перемешиванием. Исследованы системы с неограниченной (Ni–Cu) и с ограниченной (Cu–Fe) растворимостью, а также с отсутствием растворимости (Al–Fe) компонентов в твердом состоянии. Сваркой трением с перемешиванием были получены качественные соединения с взаимным проникновением одного металла в другой. Основную роль в этом процессе играет механическое перемешивание металлов и измельчение структуры. При этом диффузионные процессы незначительны. В процессе сварки происходит значительное измельчение зерна как в зоне рекристаллизации, так и в зонах термомеханического и термического влияния.

В результате сварки трением с перемешиванием (СТП) алюминия с железом образовалась зона соединения значительного объема с проникновением алюминия в железо на глубину до 2,5 мм. При этом происходит взаимодействие металлов: массоперенос в первую очередь алюминия и последующее образование соединений F_2Al_7 , $FeAl_2$.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать данный способ сварки для получения биметаллических соединений разнородных металлов, имеющих различную растворимость элементов в твердом состоянии.

Ключевые слова: биметалл, сварка трением с перемешиванием (СТП), сварное соединение, механическое, диффузия, растворимость в твердой фазе, микроструктура, рентгеноспектральный микроанализ, элементный состав, микротвердость.

Использование биметаллов позволяет сочетать эксплуатационные свойства присущие разнородным металлам в одном изделии – это коррозионная стойкость, механическая

прочность, теплопроводность, жаропрочность и т. д. Поэтому биметаллы находят все более широкое применение в современной промышленности. В силу разнородности свойств некоторых металлов, в частности в большей разнице в температуре плавления, их соединение в качестве биметаллов, например, сваркой плавлением невозможно. Именно СТП [1] открыло значительные возможности для их более широкого применения.

Большинство исследователей указывает на многочисленные преимущества СТП по сравнению с другими способами получения неразъемных соединений [2–7]: сохранение в значительной мере свойств основного металла в зоне соединения, отсутствие вредных испарений и ультрафиолетового излучения в процессе соединения; возможность получения бездефектных швов на сплавах, отсутствие необходимости в применении присадочных материалов и защитных газов.

На практике метод СТП применяют для соединения многих разнородных металлов. Так в работах [8–11] приведены результаты сварки алюминия и стали, алюминия и магния, в работах [12, 14] – Al–Cu, Ni–Cu. Как отмечают авторы этих публикаций, решающее влияние на свариваемость разнородных металлов оказывает температура плавления, металлургическая совместимость, определяемая взаимной растворимостью соединяемых металлов в жидком и в твердом состоянии, а также образование хрупких химических соединений – интерметаллидов.

Целью настоящей работы является получение методом СТП биметаллов, изучение особенностей их структуры и свойств с различной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Исследовались соединения нахлесточного типа, полученные способом СТП.

Технология сварки, и используемый при этом инструмент рассмотрены в [14, 15].

Для СТП были отобраны пластины исходных сплавов: меди, никеля, стали 3, алюминия и армко-железа.

Режимы СТП и характеристика свариваемых материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы СТП и характеристика свариваемых материалов

Тип биметаллич. соединения	Марка материала верхней/нижней пластины	Толщина пластин, мм	Глубина погружения - инструмента, мм	Микро-твердость пластин, МПа	Скорость сварки, мм/мин	Скорость вращения - инструмента, об/мин
Ni / Cu	Н1 / М0	4/10	5,0	1069/1160	40	1250
Cu / Сталь	М0 / Ст.3	7/8	8,0	1160/2160	60	1250
Al / Fe	АМг-6 /008ЖР	5/3	6,0	552/1260	60	1250

При проведении исследований использовали комплексную методику, включающую металлографию (оптический микроскоп «Неофот-32») и дюриметрический анализ (твердомер М-400 фирмы «LECO» при нагрузке 0,249 и 0,496 Н). Электронное исследование структуры и определение ее элементного состава методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) проводили на базе аналитического комплекса, состоящего из сканирующего электронного микроскопа JSM-35 CF фирмы «JEOL» (Япония) и рентгеновского спектрометра с дисперсией по энергии рентгеновских квантов (модель INCA Energy-350 фирмы «Oxford Instruments» (Великобритания)). Для выявления структуры исследуемых соединений использовали химические реактивы [16].

Методом СТП было получено и исследовано соединение Ni/Cu, как металлов с неограниченной растворимостью элементов друг в друге. В зоне соединения никеля и меди

происходит взаимное проникновение этих металлов на глубину до 3 мм (рис. 1). Массоперенос металлов отмечен в виде взаимопроникающих чередующихся полос, направленных в сторону движения – инструмента (рис. 2).

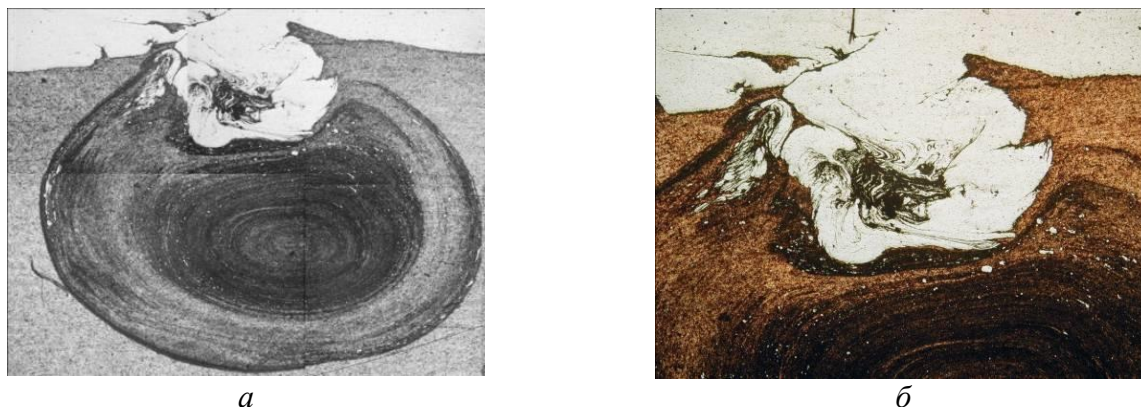


Рис. 1. Микроструктура биметаллического соединения Ni/Cu (поперечное сечение): а – общий вид ($\times 15$); б – область массопереноса Ni в Cu ($\times 50$)

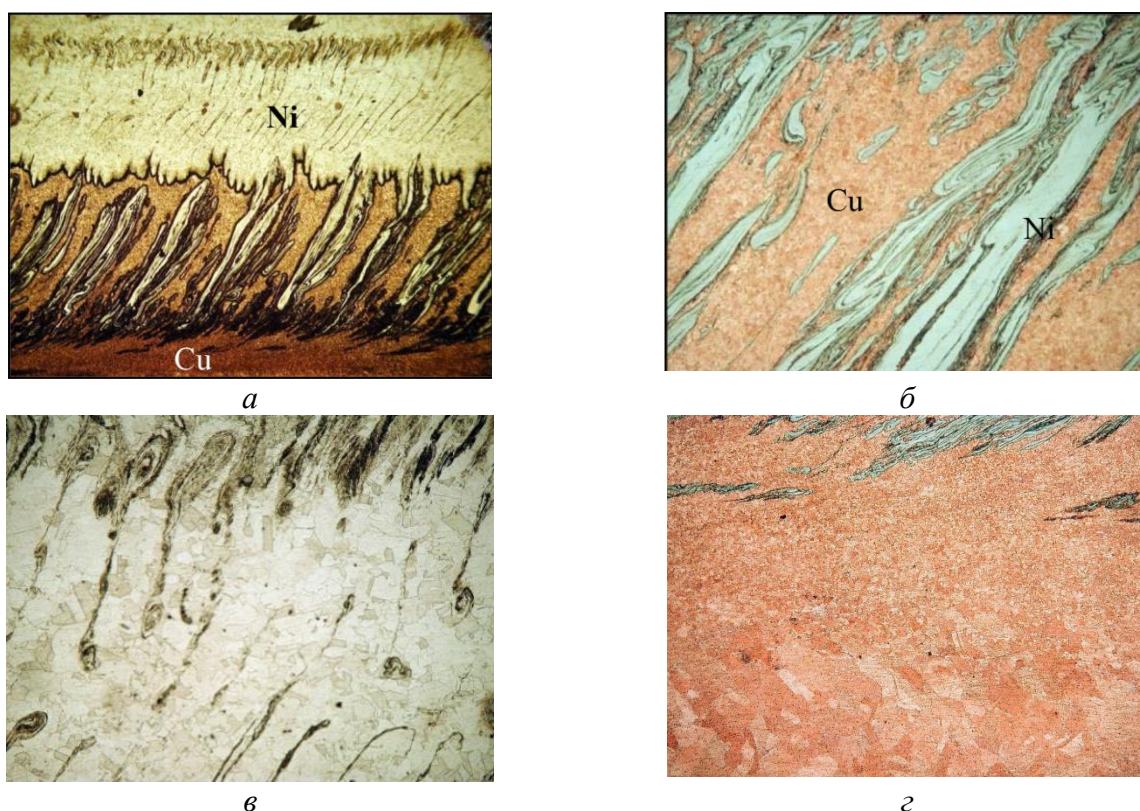
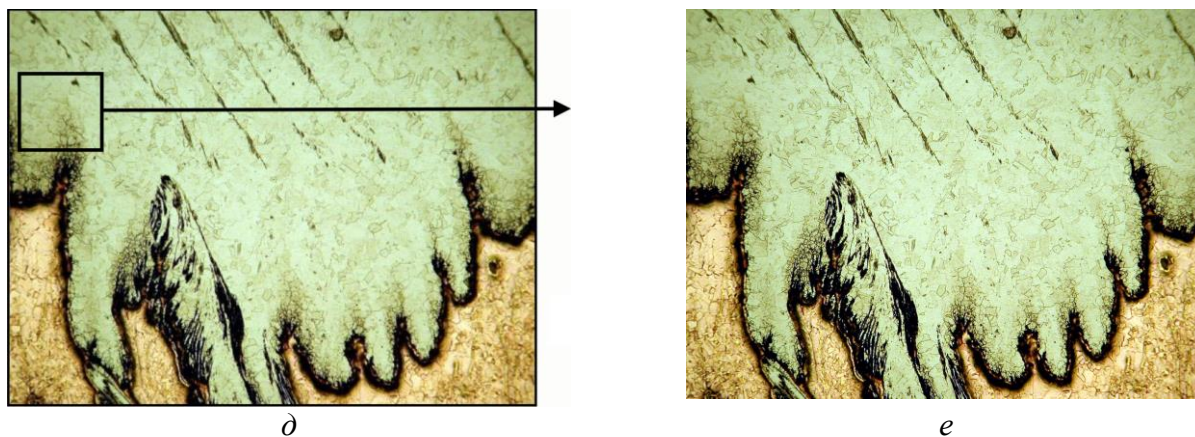


Рис. 2. Микроструктура сварного соединения Ni/Cu (продольное сечение): а, б – зона массопереноса Ni в Cu; в – зона термомеханического влияния в Ni; г – зона термомеханического влияния в Cu; д, е – зона взаимодиффузии Cu и Ni; а - $\times 15$; б-д – $\times 100$; е – $\times 1000$



Окончание рис. 2

Исследованиями установлено, что взаимодиффузия меди и никеля происходит преимущественно по границам зерен. При этом ведущую роль в процессе СТП играет массоперенос металлов, в значительно меньшей степени – их взаимодиффузия.

С целью изучения возможности получения способом СТП соединения разнородных металлов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии была рассмотрена система медь – железо.

Известно, что добавка углерода в железо несколько уменьшает растворимость меди в твердом железе, но не меняет общей картины. Поэтому для анализа процесса рассматривали сварной шов медной пластины и низкоуглеродистой стали, режимы сварки приведены в табл. 1.

Исследование сечений сварного соединения показало, отсутствие трещин, непроваров и пор (рис. 3). Поскольку сталь имеет твердость гораздо больше меди, то в поперечном сечении зоны соединения не произошло образование классического овального ядра (рис. 3 а).

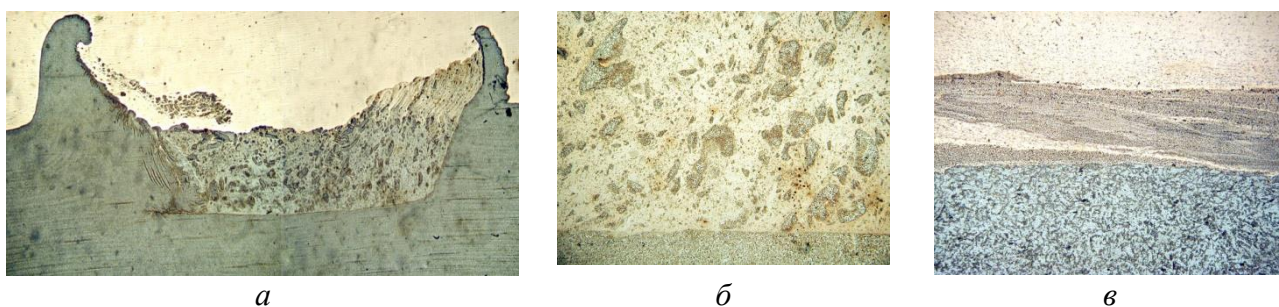


Рис. 3. Микроструктура, соединения Си–Ст.3, полученного СТП: а – поперечное сечение ($\times 15$); б – область перемешивания; в – продольное сечение ($\times 100$)

Зона соединения в верхней части состоит из меди, а нижняя часть – из смеси стальных частичек различной величины в медной матрице. Установлено, что в продольном сечении соединение носит зубчатый характер. В меди наблюдаются клинообразные внедрения Fe, наклоненные в сторону направления сварки. Максимальная глубина их проникновения составила 500 мкм. Эта область состоит из внедренных в деформированную медь мельчайших стальных частиц размером 1–10 мкм, микротвердость этих участков 2740–3020 МПа.

Над такими клинообразными внедрениями находится участок неполной перекристаллизации меди – зерна округлой формы размером 30–100 мкм, хаотично расположенные между зернами основного металла меди.

Ширина зоны ЗТВ в стали достигает 4,5 мм. Четко просматриваются участки неполной перекристаллизации, мелкого и среднего зерна. Участок среднего зерна расположен непосредственно в зоне соединения с медью. В зоне контакта размер зерна стали на порядок меньше, чем в основном металле. Микротвердость этого участка составляет 2290 ± 120 , в то время как ферритно-перлитной стали – 2160 ± 100 МПа.

Как показали исследования (рис. 4), клинообразные внедрения имеют ферритно-перлитную структуру и практически не содержат меди. В зоне соединения меди со сталью отмечено образование большого количества включений железа внедренных в медь в виде отдельных полос и механической смеси меди со сталью. В медной матрице зафиксировано значительное количество железа (21,75–31,69 мас. %) в виде дисперсных включений (табл. 4).

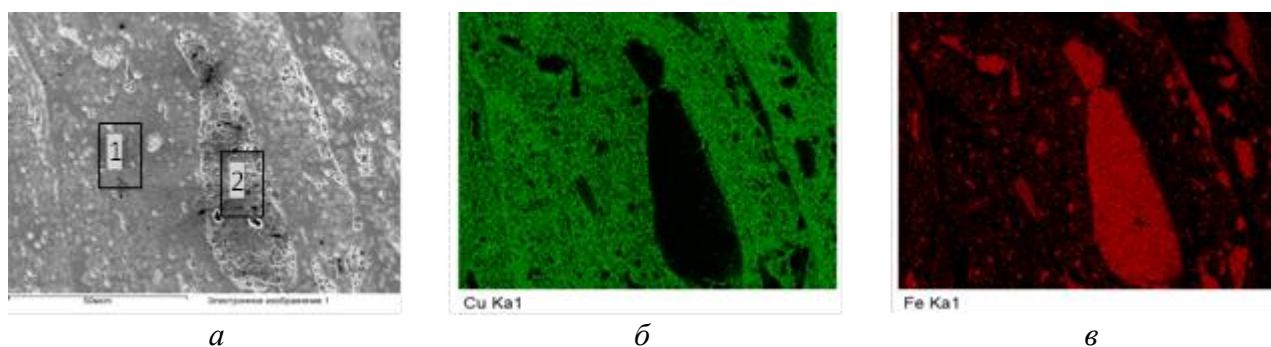


Рис. 4. Изображение зоны перемешивания Cu/Ст.3 во вторичных электронах (а), характеристическом излучении Cu (б) и Fe (в)

Таблица 2. Химический состав исследуемых участков, отмеченных на рис. 1

Исследуемый участок	Химический состав, мас./ат.			
	Si	Mn	Fe	Cu
1	0	0,26/0,29	21,47/23,72	78,27/75,99
2	0,27/0,53	1,14/1,16	97,60/97,44	0,99/0,87

Исследовав граничные участки внедренной стальной полосы (рис. 5), можно сделать предположение о том, что наряду с вкраплениями меди проходят процессы взаимодиффузии между металлами с образованием твердого раствора.

Соединения разнородных металлов способом СТП при отсутствии взаимной растворимости элементов в твердой фазе была изучена на примере системы Fe–Al. В поперечном сечении зоны соединения образуется ядро размером 8,2×5,4 мм и клинообразное внедрение железа на глубину 2 мм с двух сторон от ядра (рис. 5). Структура ядра неоднородная, состоит из трех зон. Ядро в первую очередь образовалось в результате массопереноса алюминия, так как все зоны по данным РСМА имеют алюминиевую матрицу.

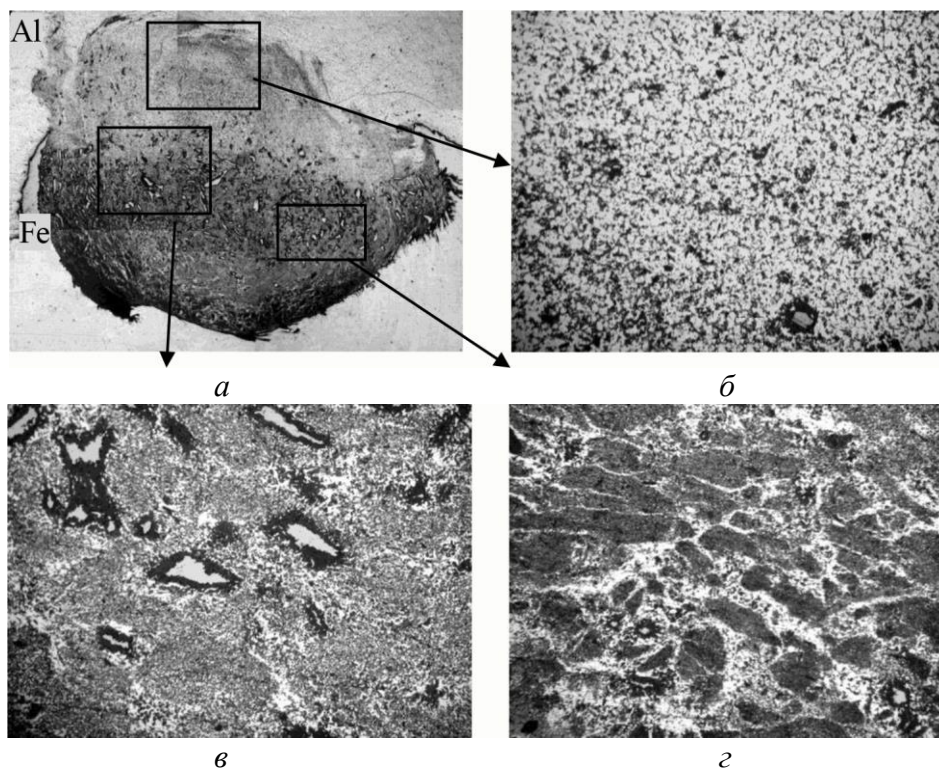


Рис. 5. Общий вид (а) и микроструктура (б–г) поперечного шлифа сварного соединения Fe/Al, полученного СТП (а – $\times 15$; б–г – $\times 100$)

В зоне ядра, которая непосредственно контактирует с железом, основной структурной составляющей является алюминиды Fe_2Al_7 и $FeAl_2$, которые образуют языкообразные внедрения в Fe. Алюминиды железа расположены в Al матрице, поэтому микротвердость этой зоны невелика – 2340–3220 МПа, относительно микротвердости самих интерметаллидов (~ 10000 МПа). В структуре ядра наблюдается микропористость, что очевидно обусловленная образованием интерметаллидных фаз. По данным РСМА в Al – сплаве и в Fe на расстоянии 10–15 мкм от ядра взаимодиффузия элементов не наблюдается.

Таким образом, в результате исследования биметаллического соединения Al/Fe установлено, что в процессе СТП происходит взаимодействие металлов – массоперенос, в первую очередь алюминия, и последующее образование соединений: $FeAl_3$, Fe_2Al_7 , $FeAl_2$. Наиболее твердые участки зоны соединения, состоящие из интерметаллиды в Al-матрице, более чем в 3 раза мягче алюминидов железа.

При исследовании продольного сечения зоны соединения обнаружено, что она сплошная, не содержит дефектов и носит волнообразный характер, изменяясь по ширине от 3 до 7 мм. Ее структура состоит из участков, аналогичных выше описанным, при анализе поперечного сечения данного сварного соединения.

Выводы

При СТП Cu/Ni получается биметаллическое соединение, с взаимным проникновением одного металла в другой на глубину ~ 3 мм. При этом происходит измельчение структуры. Ведущую роль в процессе СТП играет массоперенос металлов и в меньшей степени их взаимодиффузия.

В результате исследования сварного соединения Cu со сталью, установлено, что ведущую роль, как и в предыдущей системе, играет массоперенос металла. При этом значительное измельчение зерна происходит, как в зоне рекристаллизации, так и в зонах термомеханического и термического влияния.

При сварке Al/Fe образуется зона соединения с проникновением Al в Fe на глубину до 2,5 мм. С образованием соединений: $FeAl_3$, Fe_2Al_7 , $FeAl_2$. Наиболее твердые участки зоны соединения (2340–3220 МПа) состоят из интерметаллидов, расположенных в Al матрице, поэтому микротвердость этой структуры в несколько раз ниже микротвердости самих интерметаллидов.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать метод СТП для получения биметаллических материалов, при этом возможно создавать биметалл по типу наплавки.

Досліджено структури і властивості біметалевих з'єднань різнорідних металів, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням. Досліджено системи з необмеженою (Ni-Cu) і з обмеженою (Cu-Fe) розчинністю, а також з відсутністю розчинності (Al-Fe) компонентів в твердому стані. Зварюванням тертям з перемішуванням були отримані якісні з'єднання з взаємним проникненням одного металу в інший. Основну роль в цьому процесі відіграє механічне перемішування металів і подрібнення структури. При цьому дифузійні процеси незначні. У процесі зварювання відбувається значне подрібнення зерна як в зоні рекристалізації, так і в зонах термомеханічного і термічного впливу.

В результаті зварювання тертям з перемішуванням (СТП) алюмінію з залізом утворилася зона з'єднання значного обсягу з проникненням алюмінію в залізо на глибину до 2,5 мм. При цьому відбувається взаємодія металів: масоперенос в першу чергу алюмінію і подальше утворення з'єднань Fe_2Al_7 , $FeAl_2$.

Результати проведених досліджень дозволяють рекомендувати даний спосіб зварювання для отримання біметалевих з'єднань різнорідних металів, що мають різну розчинність елементів у твердому стані.

Ключові слова: біметал, зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП), зварне з'єднання, механічне, дифузія, розчинність в твердій фазі, мікроструктура, рентгеноспектральний мікроаналіз, елементний склад, микротвердість.

**G. M. Grigorenko, M. A. Poleshchuk, L. I. Adeeva, A. Yu. Tunik, V. I. Zelenin, V. A. Lukash,
E. V. Zelenin, S. D. Zabolotnie, Yu. N. Nikityuk**

STRUCTURE AND PROPERTIES OF BIMETALS DRIED BY FRICTION WITH MIXING

The structures and properties of bimetallic compounds of dissimilar metals obtained by friction stir welding (FSW) were studied. Systems with unlimited (Ni-Cu) and limited (Cu-Fe) solubility, as well as the absence of solubility (Al-Fe) of the components in the solid state are investigated. By friction stir welding, were obtained qualitative compounds with mutual penetration of one metal into another. The main role in this process is the mechanical mixing of metals and grinding of the structure. The diffusion processes are insignificant. In the process of welding, there is a significant grinding of the grain both in the recrystallization zone and in the zones of thermomechanical and thermal influence.

As a result of friction stir welding of aluminum with iron, a zone of considerable volume was formed with penetration of aluminum into iron to a depth of 2.5 mm. In this case, the interaction of metals takes place: mass transfer primarily of aluminum and the subsequent formation of the compounds Fe_2Al_7 , $FeAl_2$.

The results of the conducted investigations allow us to recommend this welding method for obtaining bimetallic compounds of dissimilar metals having different solubility of the elements in the solid state.

Key words: *bimetal, friction stir welding (STF), welded joint, mechanical, diffusion, solubility in solid phase, microstructure, X-ray microanalysis, elemental composition, microhardness.*

Литература

1. GB Patent № 9125978.8. Friction stir butt welding / W.M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needam et al. – Publ. Oct. 1995.
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, 1987. – 236 с.
4. Mishraa R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing // Mater. Sci. and Eng. – 2005. – 50. – P. 1–78.
5. Эрикссон Л. Г., Ларссон Р. Ротационная сварка трением – научные исследования и новые области применения // Технология машиностроения. – 2003. – № 6. – С. 81–84.
6. Людмирский Ю. Г., Котлышев Р. Р. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов в строительстве // Науч. вестн. ВГАСУ. Стр-во и архитектура. – 2010. – № 3. – С. 15–22.
7. Технология восстановительного ремонта слябовых кристаллизаторов МНЛЗ наплавкой трением с перемешиванием / Ю. Н. Никитюк, Г. М. Григоренко, В. И. Зеленин и др. // Современ. электрометаллургия. – 2013. – № 3. – С. 51–55.
8. Watanabe H., Takayama H., Yanagisawa A. Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding // J. Mater. Proc. Technol. – 2006. – 178. – P. 342–349.
9. 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. 355–358.
10. Microstructure of friction stir welding of aluminium alloy to magnesium alloy / A. Kostka, R. S. Coelho, J. dos Santos, A.R. Pyza // Ibid. – 2000. – 66. – P. 953–956.
11. Kwon Y. J., Shigematsu I., Saito N. Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminium alloys // Materials Letters. – 2008. – 62. – P. 3827–3829.
12. 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. // Mater. Sci. and Eng. – 2011. – 528. – P. 4683–4689.
13. Saeida T., Abdollah-Zadehb A., Sazgarib B. Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction stir welding // J. Alloys and Compounds. – 2010. – 490. – P. 652–655.
14. Технология ремонта медных слябовых кристаллизаторов наплавкой трением с перемешиванием / Ю. А. Никитюк, В. И. Зеленин, М. А. Полещуки др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения. Вып. 16. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2013. – С. 520–523.
15. Патент на промисловий зразок № 25394, Україна. Вставка робочого інструменту установки для зварювання і наплавлення методом тертя з перемішуванням / М. А. Полещук, Г. М. Григоренко, П. М. Кавуненко та ін. – Опубл. 10.09.13, Бюл. № 17.
16. Беккерт М. К., Клемм Х. Способы металлографического травления: справочник. – М.: Metallurgia, 1988. – 400 с.

Поступила 27.06.18

References

1. Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needam, J. C., et al. (1995). Patent 9125978.8 of GB.
2. Vill, V. I. (1970). *Svarka treniem metallov [Friction welding of metals]*. Leningrad: Mashinostroenie [in Russian].

3. Lebedev, V. K., Chernenko, I. A., Mikhalski, R., et al. (1987). *Svarka treniem: spravochnik [Friction welding: a guide]*. Leningrad: Mashinostroenie [in Russian].
4. Mishraa, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing, *Mater. Sci. and Eng.*, 50, 1–78.
5. Eriksson L. G., & Larsson R. (2003). Rotatsionnaia svarka treniem – nauchnye issledovaniia i novye oblasti primeneniia [Rotational friction welding – scientific research and new applications]. *Tekhnologiya mashinostroeniya – Technology of mechanical engineering*, 6, 81–84 [in Russian].
6. Lyudmirskiy, Yu. G., & Kotlyshev, P. P. (2010). Svarka treniem s peremeshivaniem aliuminievykh splavov v stroitelstve [Friction welding with mixing of aluminum alloys in construction]. *Nauch. vestn. VGASU. Str-vo i arkhitektura – Scientific Herald of VGASU. Construction and architecture*, 3, 15–22 [in Russian].
7. Nikitiuk, Yu. N., Grigorenko, G. M., Zelenin, V. I., Et al. (2013). Tekhnologiya vosstanovitelnogo remonta sliabovykh kristallizatorov MNLZ naplavkoi treniem s peremeshivaniem [Technology of repair repair of slab molds of continuous casting machine with friction stir welding]. *Sovremen. Elektrometallurgiya – Modern Electrometallurgy*, 3, 51–55.
8. Watanabe, H., Takayama, H., & Yanagisawa, A. (2006). Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding. *J. Mater. Proc. Technol.*, 178, 342–349.
9. Lee, W.-B., Schmuecker, M., Mercardo, U. A., et al. (2006). Interfacial reaction in steel-aluminum joints made by friction stir welding. *Scripta Mater.*, 55, 355–358.
10. Kostka, A., Coelho, R. S., dos Santos, J., & Pyza, A.R. (2009). Microstructure of friction stir welding of aluminium alloy to magnesium alloy. *Scripta Mater.*, 60, 953–956.
11. Kwon, Y. J., Shigematsu, I., & Saito, N. (2008). Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminium alloys. *Materials Letters.*, 62, 3827–3829.
12. Xue, P., Ni, D., R., Wang, D., et al. (2011). Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints. *Mater. Sci. and Eng.*, 528, 4683–4689.
13. Saeida, T., Abdollah-Zadehb, A., & Sazgarib B. (2010). Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction stir welding. *J. Alloys and Compounds*, 490, 652–655.
14. Nikitiuk, Yu. A., Zelenin, V. I., Poleshchuk, M. A. et al. (2013). Tekhnologiya remonta mednykh sliabovykh kristallizatorov naplavkoi treniem s peremeshivaniem [Technology of repair of copper slab crystallizers by friction welding with mixing]. *Porodorazrushayushchii I metalloobrabativayushchii instrument – tekhnika I tekhnologiya ego izgotovleniya i primineniya – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications, Vol. 16*, 520–523. [in Russian].
15. Poleshchuk, M. A., Grigorenko, G. M., Kavunenko, P. M., et al. (2013). Patent of Ukraine 25394. [in Ukrainian].
16. Bekkert, M. K., & Klemm Kh. (1988). *Sposoby metallograficheskogo travleniia: spravochnik [Methods of metallographic etching: a guide]*. – Moscow: Metallurgiya.