СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 620.22:669

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-6-253-7-11

О. В. Слаутин, С. П. Писарев, Д. В. Проничев, В. П. Кулевич, М. Н. Чикалов, И. В. Бут

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА НА КИНЕТИКУ ДИФФУЗИИ В БИМЕТАЛЛИЧЕСКОМ КОМПОЗИТЕ СИСТЕМЫ Cu–Al*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Исследовано влияние электропереноса на кинетику роста диффузионной зоны при термообработке сваренного взрывом биметаллического слоистого композита системы Cu–Al. Показано, что пропускание электрического тока может ускорить рост диффузионной прослойки до 30 % на малых (до $\approx 60 \div 90$ минут) выдержках.

Ключевые слова: сварка взрывом, электроперенос, интерметаллиды, система Cu–Al, диффузия, покрытие.

O. V. Slautin, S. P. Pisarev, D. V. Pronichev, V. P. Kulevich, M. N. Chikalov, I. V. Booth

INFLUENCE OF ELECTRIC TRANSFER ON DIFFUSION KINETICS IN A BIMETALLIC COMPOSITE OF THE Cu - Al SYSTEM*

Volgograd State Technical University

The effect of electrotransfer on the kinetics of growth of the diffusion zone during heat treatment of an explosion-welded bimetallic layered composite of the Cu–Al system has been investigated. It is shown that passing an electric current can accelerate the growth of the diffusion layer by up to 30% at short (up to $\approx 60 \div 90$ minutes) exposures.

Keywords: explosion welding, electrical transfer, intermetallic compounds, Cu–Al system, diffusion, coating.

Известно, что покрытия на различных металлах получают из множества бинарных и многокомпонентных систем [1, 2]. В последнее время довольно успешно проявляют себя покрытия, сформированные с использованием уникальных способов их нанесения на основе керамики, оксидов, нитридов, или интерметаллидов различных систем: Cu–Ti, Ti–Fe, Ti–Al, Fe–Al, Ni–Al, Mg–Cu, Mg–Al, Ni–Ti, Cu–Al и т. д. [1–4].

Для создания износостойких покрытий на основе интерметаллидных соединений применяют комбинированные технологии, состоящие из операций предварительного нанесения на поверхность детали слоя металла, способного образовывать с металлом основы интерметаллидные соединения, и последующего диффузионного отжига при термообработке (ТО) полученной композиции. Для получения значительных толщин покрытий и ускорения процесса их роста с обеспечением заданной структуры, со-

става и свойств, заключительная операция требует различных вариантов интенсификации диффузии [3].

Как показывают многочисленные исследования, проводимые в последнее десятилетие на кафедре «Материаловедение и КМ» ВолгГТУ, значительного повышения интенсивности диффузионного взаимодействия между разнородными металлами можно добиться применением режимов ТО, обеспечивающих протекание процессов в присутствии жидкой фазы [3, 5–8], образующейся в результате контактного плавления (КП) [9–14], а значительным недостатком этого решения является высокая степень структурной неоднородности получаемой зоны взаимодействия (ЗВ). Отличительной особенностью диффузионной зоны (ДЗ), сформированной при твердофазном взаимодействии (ТФВ), как правило, является более однородное строение, однако скорость ее формирования, значительно ниже.

© Слаутин О. В., Писарев С. П., Проничев Д. В., Кулевич В. П., Чикалов М. Н., Бут И. В., 2021.

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

Интенсификация диффузионного процесса возможна введением в систему при ТО дополнительной энергии за счет пропускания электрического тока [15, 16, 17], ультразвуковых колебаний [18–20], электро-физического воздействия (за счет возникновения микродуговых разрядов, т. е. эффекта «электронного ветра») [21–23] и т. д.

Комплексное одновременное воздействие нескольких факторов должно также оказывать влияние на ускорение процессов диффузии. Так, например, в работе [19] в результате выявления и обобщения основных закономерностей формирования и роста на межслойных границах сваренного взрывом (СВ) ДЗ слоистого композита (СКМ) системы Cu-Al экспериментально доказано, что воздействие ультразвука способствует сокращению латентного периода зарождения интерметаллидных фаз на межслойной границе, снижает температуру начала эвтектического превращения (примерно на 10 °С).

Например, авторы работ [15, 16] при исследовании явления КП в эвтектических бинарных системах, выявили, что при пропускании электрического тока, температура КП может оказаться ниже, чем температура эвтектического превращения (ΔT – эффект КП). В работе [17] было установлено, что пропускание электрического тока через сваренный взрывом СКМ системы Fe-Al при ТО приводит к интенсификации диффузионного взаимодействия на межслойной границе. Выявленный эффект объясняется авторами [17] явлением электропереноса в результате реализации процесса КП, согласно [14, 15].

Поскольку в покрытиях, сформированных на основе купридов алюминия, полученных из сваренных взрывом СКМ в твердой фазе формируется однородная ДЗ, обладающая высокой твердостью и износостойкостью, то задача интенсификации диффузионных процессов (при ТФВ) в них весьма актуальна, целью настоящей работы явилось исследование влияние электропереноса на кинетику диффузии в этой системе.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на сваренном взрывом СКМ состава медь М1 + алюминий АД1 (6 + 7 мм). СВ выполняли по плоскопараллельной схеме на режимах, обеспечивающем качественное соединение слоев с минимальным уровнем физической и химической микронеоднородности на межслойной границе; ТО проводили в печи SNOL 8.2/1100 в диапазоне температур (t) 530 ÷ 580 °С. Температурный диапазон выбран из следующих соображений: нижняя граница соответствует наибольшей интенсивности протекания гомогенных (твердое тело-твердое тело) реакций в исследуемых системах; верхняя граница температур позволяет гарантировано реализовать эффект контактного плавления (> 548 °С – для Cu-Al) [24].

Пропускание постоянного тока через образцы осуществляли с помощью установки, состоящей из автотрансформатора (1), понижающего трансформатора (2) и диодного выпрямительного моста – 3 (рис. 1). Плотность тока (j) в образцах изменялась от 0,03 до 0,2 А/мм². Металлографические исследования выполняли на модульном металлографическом микроскопе Олимпус ВХ-61.

Рис. 1. Схема эксперимента:
1 – автотрансформатор; 2 – понижающий трансформатор; 3 – выпрямительный мост;
4 – контрольная термопара; 5 – печь SNOL 8.2/1100; 6 – исследуемый образец

Результаты и их обсуждение

Металлографический анализ образцов системы Cu-Al после ТО при 530 °С по бестоковому режиму и с пропусканием тока различной плотности, показал (рис. 2), что в обоих случаях структура ДЗ на межфазной границе имеет характерную для механизма ТФВ структуру и представляет собой тонкую прослойку интерметаллидов с двумя визуально различимыми слоями.

Прохождение постоянного электрического тока через образцы приводит к незначительному росту ДЗ во всем исследованном диапазоне выдержек, однако с ростом времени при ТО,

воздействие тока практически нивелируется (рис. 3, 4).

Таким образом, анализ результатов проведенных исследований показал, что пропускание электрического тока в процессе ТО может при определенных условиях ускорять диффузию в системе Cu-Al. Однако, такой эффект реализуется лишь на малых выдержках, причем пропорционально росту плотности тока (рис. 3, 4). Так, выдержка в течение 1 часа (рис. 3) позволила сформировать усредненную диффузионную прослойку суммарной толщиной от ≈ 32 мкм (при $j = 0,03$ А/мм²) до ≈ 39 мкм (при $j = 0,2$ А/мм²).

а

б

Рис. 2. Структура ДЗ после ТО при 530 °С (3 ч) в бестоковом режиме (а) и с пропусканием тока плотностью 0,15 А/мм² (б) $\times 500$. Слой алюминия АД1 – внизу

Рис. 3. Влияние времени выдержки и плотности постоянного тока на толщину ДЗ на границе М1-АД1 после ТО при 530 °С

Пропускание электротока позволило увеличить сформированную прослойку на 30 % по сравнению с образцами, после ТО в течение того же времени без пропускания тока (рис. 4), причем изменение полярности не оказывает существенного влияния на кинетику диффузии (рис. 3, 4). При увеличении продолжительности ТО свыше 3 ч. влияние пропускаемого тока на

диффузионные процессы практически отсутствует, причем вне зависимости как от j , так и от полярности (рис. 3, 4). В отличие от результа-

Рис. 4. Кинетика роста ДЗ на границе М1-АД1 при ТО при 530 °С в бестоковом режиме (1) и с пропусканием постоянного тока наибольшей плотности (0,2 А/мм²) прямой (2) и обратной (3) полярностью («+» через Cu)

тов подобных исследований, проведенных на бинарной системе Fe-Al [17], не обнаружено также влияние пропускаемого тока во всем исследуемом диапазоне его плотности и на температуру КП в системе Cu-Al (как и на свойства и состав формируемой при его реализации ЗВ).

Причиной интенсификации диффузионных процессов на малых (до 90 минут) выдержках может являться локальный перегрев ДЗ за счет высокого электрического сопротивления интерметаллической прослойки, образовавшейся в результате твердофазной диффузии на границе соединения М1-АД1, а также за счет создания направленного диффузионного потока, вызванного прохождением постоянного электрического тока (явление электропереноса [14]). Степень локального перегрева была оценена с помощью внешней термодомы: повышение температуры образца при прохождении через него постоянного тока максимальной плотности ($j = 0,2 \text{ А/мм}^2$) составляет $\approx 10\div 12 \text{ }^\circ\text{С}$. Однако, такого незначительного повышения t явно недостаточно для интенсификации роста ДЗ, поэтому на увеличение ее толщины, более значительное влияние по нашему мнению, оказывает явление электропереноса.

Причиной выявленной особенности ускорения диффузии лишь при незначительных выдержках, скорее всего является полностью расходующийся запас энергии (который сформировался в зоне соударения пластин при СВ) за этот временной интервал в процессе ТО. Таким образом, пропускание электрического тока способно ускорить диффузию, когда в системе есть элементы (составляющие), находящиеся в неравновесном состоянии, имеющие избыток внутренней энергии. На систему, находящуюся в энергетическом равновесии, подобное воздействие пропусканием электротока влияния практически не оказывает, или оно несоизмеримо мало и не превышает погрешности эксперимента.

Выводы

1. Пропускание электрического тока в процессе ТО биметалла системы Cu-Al может ускорить формирование и рост ДЗ при незначительных по времени выдержках, что можно использовать для повышения производительности технологического процесса создания покрытий толщиной до 30–50 мкм в системе Cu-Al.

2. Эффект ускорения процесса диффузии на малых по времени выдержках объясняется низким значением приложенной при пропускании

тока энергии, что недостаточно для равновесной системы, а запас избыточной внутренней энергии в зоне соударения, аккумулируемой при СВ, полностью исчерпывается в течение 1–2 часов при ТО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спектор, Ю. Е. Технология нанесения и свойства покрытий / Ю. Е. Спектор, Р. Г. Еромасов // Курс лекций. – Красноярск : СФУ, 2008. – 271 с.
2. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении : монография / Б. Н. Гузанов, С. В. Косицын, Н. Б. Пугачева. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 244 с.
3. Гуревич, Л. М. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия: монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгу́н, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – М. : Металлургиздат, 2016. – 346 с.
4. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанотазным упрочнением / Ю. Р. Колобов [и др.] ; под. ред. Е. Н. Каблова, Ю. Р. Колобова. – М. : МИСиС издательский дом, 2008. – 326 с.
5. Механические свойства СИК системы Cu-Al с интерметаллидной прослойкой, сформированной в твердой жидкой фазе / В. Г. Шморгу́н, Ю. П. Трыков, О. В. Слаутин, С. А. Абраменко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»); вып. 4). – С. 48–51.
6. Трыков, Ю. П. Многослойные титано-стальные интерметаллидные композиты с повышенными жаропрочными свойствами / Ю. П. Трыков, О. В. Слаутин, С. А. Абраменко // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 9. – С. 67–68.
7. О взаимодействии компонентов при твердо- и жидкофазном взаимодействии на межслоистой границе композита алюминий АД1 + сталь 12Х18Н10Т / В. Г. Шморгу́н, Д. В. Проничев, В. П. Кулевич, О. В. Слаутин, Н. А. Артемьев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (225) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 14–17.
8. Формирование покрытия на поверхности медных деталей при жидкофазном взаимодействии в слоистой системе Al-Ti-Cu / В. Г. Шморгу́н, О. В. Слаутин, В. Н. Арисова, Д. А. Евстропов, Р. Е. Новиков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (168) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 13–19.
9. Кинетика взаимодействия сплава Х20Н80 с жидким алюминием / В. Г. Шморгу́н, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, А. С. Лыгин, Н. В. Кривченко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 15 (194) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 15–22.
10. Формирование покрытия на поверхности медных деталей при жидкофазном взаимодействии в слоистой системе Al-Ti-Cu / В. Г. Шморгу́н, О. В. Слаутин, В. Н. Арисова, Д. А. Евстропов, Р. Е. Новиков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (168) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 13–19.
11. Шморгу́н, В. Г. Effect of Contact Melting Regime on Structure and Properties of Coatings of the Copper-Titanium System / В. Г. Шморгу́н, О. В. Слаутин, Д. А. Евстропов // Metallurgist. - 2016. - Vol. 60, No. 5-6. - С. 635-640.

12. Formation of Ti-Cu-Based Intermetallic Coatings on the Surface of Copper During Contact Melting / В.Г. Шморгун, Л.М. Гуревич, О.В. Слаутин, В.Н. Арисова, Д.А. Евстропов // *Metallurgist*. - 2016. - Vol. 59, Issue 9-10 (January 2016). - С. 974-979.

13. Шморгун, В. Г. Features of Diffusion Interaction in Steel-Aluminum Composite After Explosive Welding and Aluminizing by Melt Immersion / В.Г. Шморгун, О.В. Слаутин, В.П. Кулевич // *Metallurgist*. - 2019. - Vol. 63, No. 7–8. - Р. 766-774.

14. Ахкубеков, А. А. Контактное плавление металлов и наноструктур : монография / А. А. Ахкубеков, Т. А. Орквасов, В. А. Созаев. – Москва : Физматлит, 2008. – 150 с.

15. Ахкубеков, А. А. Начальная стадия контактного плавления, как низкоразмерный эффект / А. А. Ахкубеков, М. М. Вайсултанов, С. И. Ахкубекова // *Известия вузов. Северокавказский регион. Серия «Естественные науки»*. – 2005. – № 9. – С. 56–64.

16. Нажмудинов, А. М. Влияние постоянного электрического тока и примесей на процессы контактного плавления в системах висмут – теллур и индий – свинец : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук / Нажмудинов Абдуразман Мухтарович ; ДГПУ. – Махачкала, 2004. – 22 с.

17. Влияние электропереноса на кинетику диффузии в системе Fe-Al / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, С. П. Писарев, В. П. Кулевич // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 9 (188) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 13–15.

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

19. Влияние ультразвукового воздействия на диффузионные процессы при термообработке сваренного взрывом СКМ медь М1 + алюминий АД1 / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, Е. В. Кузьмин, В. П. Кулевич // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 10 (245) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 18–20.

20. Влияние ультразвука на кинетику роста диффузионной зоны при термообработке биметалла никель-алюминий / В. Г. Шморгун, А. И. Богданов, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич, С. А. Кузнецов, Р. Д. Евчиц // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 4 (251) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 18–23.

21. Степанов, М. С. Причины ускорения диффузии при микродуговой цементации / М. С. Степанов, Ю. М. Добровольский, Ю. А. Корнилов // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2016. – № 8. – С. 34–38.

22. Степанов, М. С. Микродуговое поверхностное легирование стали : феномены и механизмы : монография / М. С. Степанов, Ю. М. Добровольский. – Издательский центр ДГТУ: Ростов-на-Дону. – 2016. – 209 с.

23. Степанов, М. С. Физические аспекты микродугового поверхностного легирования стали : монография / М. С. Степанов. – Издательский центр ДГТУ: Ростов-на-Дону. – 2019. – 155 с.

24. Шморгун, В. Г. Механизм контактного плавления в системе Al–Cu / В. Г. Шморгун, В. П. Кулевич, В. В. Савченко // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 2 (181) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 21–24.