

В.Г. Шморгун, О.В. Слаутин, Д.А. Евстропов, Р.Е. Новиков

Волгоградский государственный технический университет

# ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Al – Ti – Cu, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ ЖИДКОФАЗНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НА МЕДНЫХ ПОДЛОЖКАХ\*

Комплексная технология получения интерметаллидных покрытий на поверхности металлов, обладающих высокими тепло- и электропроводностью, но низкой износостойкостью, разработанная в Волгоградском государственном техническом университете [1 – 3], включает следующие последовательные операции: сварку взрывом многослойных заготовок из исходных пластичных металлов, образующих при взаимодействии интерметаллидные фазы; их последующее формоизменение обработкой давлением, позволяющее получать изделия требуемой геометрической формы; термическую обработку (ТО) в условиях контактного плавления для формирования на межслойных границах многослойной (матрица – интерметаллид) или однородной структуры с заданным химическим и фазовым составом.

Целью настоящей работы являлось исследование фазового состава и микромеханических свойств покрытий системы Al – Ti – Cu, формируемых при жидкофазном взаимодействии на медных подложках.

Исследования проводили на трехслойном слоистом композите (СКМ) состава медь М1 + титан ВТ1-0 + алюминий АД1 (толщина слоев 5,0, 0,3 и 0,6 мм соответственно), полученном путем последовательной сварки взрывом пластины меди М1 с пластинами титана ВТ1-0 и алюминия АД1.

Металлографические исследования образцов выполняли на модульном оптическом микроскопе Olympus BX-61 с фиксацией микроструктур цифровой камерой DP12, измерения микротвердости – на микротвердомере ПМТ-3 методом восстановленного отпечатка при массе груза 50 и 100 г, ТО осуществляли в печи SNOL 8.2/1100. Фазовый состав диффузионной зоны (ДЗ) оценивали при сопоставлении данных, полученных с помощью дифрактометра ДРОН-3 и растрового двухлучевого электронного микроскопа системы Versa 3D.

Металлографические исследования показали, что после сварки межслойная граница Cu – Ti имеет волнообразный профиль с локальными включениями оплавленного металла твердостью 4,5 – 6,0 ГПа, а граница Ti – Al – безволновой. Структура сформировавшихся при сварке взрывом участков оплавленного металла представляет собой механическую смесь меди и интерметаллидных включений, имеющих состав, близкий к 77 – 79 % Cu и 18 – 21 % Ti (ат.). Согласно диаграмме состояния Ti – Cu этот состав соответствует интерметаллиду  $TiCu_4$ .

Формирование ДЗ при температуре 910 °С происходит в условиях жидкофазного взаимодействия как на границе Al – Ti, так и на границе Cu – Ti. При выдержке в течение 30 мин рост зоны переплава в сторону меди приводит к выравниванию границы Cu – ДЗ (рис. 1, область III). Основными структурными составляющими сформировавшейся на поверхности меди зоны переплава меди и титана являются структурно свободные интерметаллиды  $\beta TiCu_4$  и  $TiCu_2$  (табл. 1, рис. 1, б, в, зоны анализа 3 – 5), на границе с непрореагировавшим титаном обнару-

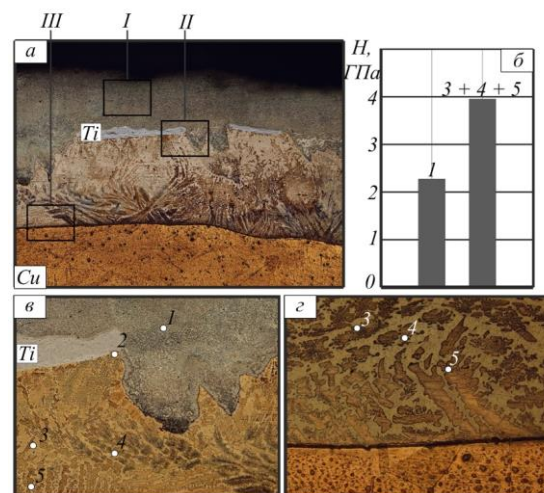


Рис. 1. Структура ДЗ (а) ( $\times 50$ ) и микротвердость (б) в зонах анализа после ТО при 910 °С в течение 0,5 ч, область взаимодействия II продуктов реакции Al – Ti и Cu – Ti (в) ( $\times 50$ ), граница III Cu – ДЗ (г) ( $\times 200$ )

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00418).

**Результаты точечного энергодисперсионного микроанализа и качественного рентгеноструктурного анализа**

| Элемент                            | Содержание, % (ат.), в зоне анализа |                                 |                   |                                          |                   |
|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------------------|-------------------|
|                                    | 1                                   | 2                               | 3                 | 4                                        | 5                 |
| Al                                 | 78,3                                | 1,3                             | 0                 | 0                                        | 0                 |
| Ti                                 | 20,5                                | 41,0                            | 30,5              | 26,7                                     | 21,6              |
| Cu                                 | 1,2                                 | 57,7                            | 69,5              | 73,3                                     | 78,4              |
| Достоверно идентифицированные фазы | TiAl <sub>3</sub> ,<br>Al(Ti)       | Ti <sub>3</sub> Cu <sub>4</sub> | TiCu <sub>2</sub> | TiCu <sub>2</sub> ,<br>TiCu <sub>4</sub> | TiCu <sub>4</sub> |

жена фаза Ti<sub>3</sub>Cu<sub>4</sub>. Продуктом взаимодействия титана с расплавом алюминия (рис. 1, а, область I) является двухфазный слой (твердый раствор и TiAl<sub>3</sub>) (табл. 1, рис. 1, а, б, зона анализа 1).

Увеличение времени ТО приводит к полному «растворению» титана и к взаимодействию находящихся в жидком состоянии продуктов реакций Al – Ti и Cu – Ti. В результате неравновесной кристаллизации образуется крайне неоднородная по толщине ДЗ структура (рис. 2), верхний слой которой представляет собой смесь фаз TiAl<sub>3</sub> и CuTi<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> (табл. 2, рис. 2, б, зона анализа 1). Ниже располагаются: однофазная прослойка CuTi<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> (табл. 2, рис. 2, б, зона анализа 2), двухфазная прослойка CuTi<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> + Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> (табл. 2, рис. 2, б, зона анализа 3) и прилегающий к меди слой переменной концентрации, в котором идентифицированы фазы Ti<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>(Al) (табл. 2, рис. 2, б, в, зона анализа 4), Ti<sub>3</sub>Cu<sub>4</sub>(Al) и TiCu<sub>2</sub>(Al) (табл. 2, рис. 2, б, в, зона анализа 5), TiCu<sub>4</sub> (табл. 2, рис. 2, б, в, зона анализа 6).

Уменьшить структурную неоднородность ДЗ позволило двукратное снижение толщины слоя алюминия и использование двойного отжига по режиму 700 °С в течение 2 ч и 910 °С в течение 1 ч. После первого отжига на титане был получен двухфазный слой с объемной долей TiAl<sub>3</sub> примерно 92 %. Второй отжиг обеспечил полное растворение титана и взаимодействие продуктов реакции процесса кон-

тактного плавления с TiAl<sub>3</sub>. Его результатом явилось формирование на поверхности меди покрытия со слоистой структурой, фазовый состав которого практически идентичен полученному при ТО по режиму 910 °С в течение 1 ч. Поверхностный слой покрытия состоит из смеси фаз TiAl<sub>3</sub> и CuTi<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> (табл. 3, рис. 3, а, зоны анализа 1, 2). Ниже располагается двухфазная прослойка CuTi<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> + Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> (табл. 3, рис. 3, а, зона анализа 3). Основными структурными составляющими покрытия являются твердые растворы на основе Ti<sub>3</sub>Cu<sub>4</sub> и TiCu<sub>2</sub> (табл. 3, рис. 3, б, в,

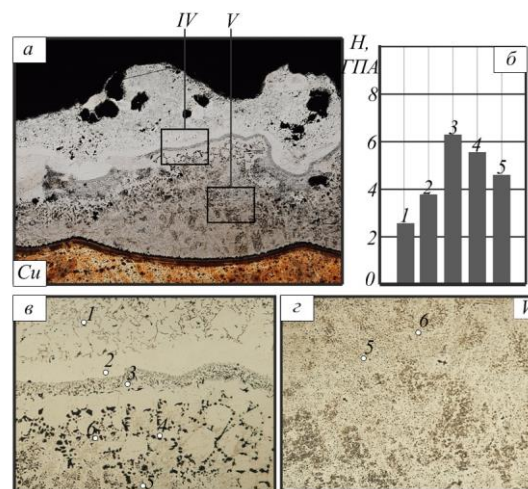


Рис. 2. Структура ДЗ (а) (×50) и микротвердость (б) в зонах анализа после ТО при 910 °С в течение 1 ч, области IV (е) (×200) и V (з) (×200)

**Результаты точечного энергодисперсионного микроанализа и качественного рентгеноструктурного анализа**

| Элемент                            | Содержание, % (ат.), в зоне анализа |                                   |                                                                        |                                      |                                                                 |                   |
|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|
|                                    | 1                                   | 2                                 | 3                                                                      | 4                                    | 5                                                               | 6                 |
| Al                                 | 74,3                                | 58,1                              | 42,8                                                                   | 8,1                                  | 7,6                                                             | 0                 |
| Ti                                 | 24,3                                | 24,6                              | 29,4                                                                   | 32,2                                 | 32,4                                                            | 19,8              |
| Cu                                 | 1,4                                 | 17,3                              | 27,8                                                                   | 59,7                                 | 60,0                                                            | 80,2              |
| Достоверно идентифицированные фазы | TiAl <sub>3</sub>                   | CuTi <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> | CuTi <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> ,<br>Al <sub>4</sub> Cu <sub>9</sub> | Ti <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> (Al) | Ti <sub>3</sub> Cu <sub>4</sub> (Al),<br>TiCu <sub>2</sub> (Al) | TiCu <sub>4</sub> |

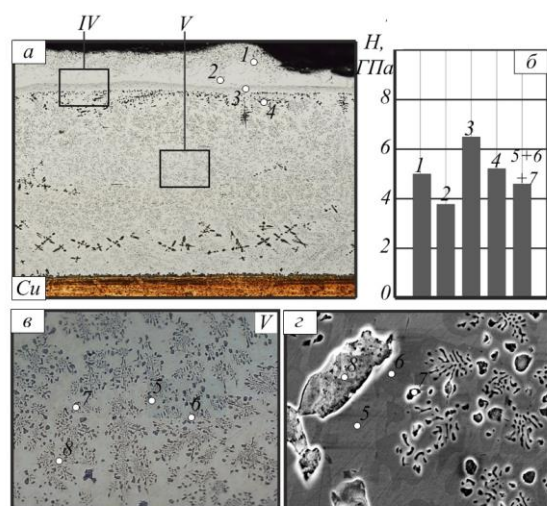


Рис. 3. Структура ДЗ (а) ( $\times 50$ ) и микротвердость (б) в зонах анализа после ТО при 700 °С в течение 2 ч и 910 °С в течение 1 ч, области V (в) ( $\times 500$ ) и VI (г) ( $\times 5000$ )

зоны анализа 5, 6), эвтектика  $\text{TiCu}_2 + \text{TiCu}_4$  (рис. 4, в) и  $\text{TiCu}_4$  (табл. 5, рис. 3, б, в, зоны анализа 7, 8).

**Выводы.** Экспериментально установлено, что в конечный состав покрытия, формируемого контактным плавлением нанесенных сваркой взрывом на медную основу слоев титана и алюминия, могут входить не только фазы, близкие по концентрации к эвтектике, но и практически любые соединения данной системы металлов. Назначаемые режимы термической обработки на первом ее этапе должны гарантировать жидкофазное взаимодействие только на межслойной границе  $\text{Ti} - \text{Al}$  и получение на титане двухфазного слоя с объемной долей  $\text{TiAl}_3$  более 90 %, а на втором – жидкофазное взаимодействие на границе  $\text{Cu} - \text{Ti}$ , полное растворение титана и взаимодействие продуктов реакции процесса контактного плавления с  $\text{TiAl}_3$ . Основными структурными составляющими покрытия являются твердые растворы на основе купридов титана  $\text{Ti}_3\text{Cu}_4(\text{Al})$  и  $\text{TiCu}_2(\text{Al})$ , эвтектика  $\text{TiCu}_2 + \text{TiCu}_4$  и  $\text{TiCu}_4$ , а поверхностный слой состоит из сме-

си фаз  $\text{TiAl}_3$  и  $\text{CuTi}_2\text{Al}_5$  и двухфазной прослойки  $\text{CuTi}_2\text{Al}_5 + \text{Al}_4\text{Cu}_9$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крашенинников С.В., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Упрочнение поверхностей стальных деталей путем формирования интерметаллидсодержащих покрытий // Перспективные материалы. 2004. № 2. С. 83 – 88.
2. Шморгун В.Г., Артемьев А.А., Антонов А.А., Евстропов Д.А., Бондаренко Ю.И. Структура и трибологические свойства покрытий на основе купридов титана // Известия ВолГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. 2014. № 23 (150). С. 30 – 32.
3. Патент 2202456 РФ. Способ получения износостойкого покрытия на поверхности стальных деталей / Крашенинников С.В., Кузьмин С.В., Лысак В.И., Долгий Ю.Г.; ВолГТУ. Заявл. 27.08.2001. Оpubл. 20.04.2003.
4. Шморгун В.Г., Слаутин О.В., Евстропов Д.А., Таубе А.О. Диффузионные процессы на межслойной границе сваренного взрывом трехслойного композита системы  $\text{Cu} - \text{Ti}$  // Изв. вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2014. № 4. С. 36 – 39.
5. Гуревич Л.М. Механизмы структурообразования при взаимодействии титана с расплавом алюминия // Известия ВолГТУ. Серия Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. № 6 (109). С. 6 – 13.

© 2015 г. В.Г. Шморгун, О.В. Слаутин,  
Д.А. Евстропов, Р.Е. Новиков  
Поступила 5 октября 2015 г.

Т а б л и ц а 3

## Результаты точечного энергодисперсионного микроанализа и качественного рентгеноструктурного анализа

| Элемент                            | Содержание, % (ат.), в зоне анализа |                            |                                                          |                                     |                                     |                            |                 |                 |
|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|
|                                    | 1                                   | 2                          | 3                                                        | 4                                   | 5                                   | 6                          | 7               | 8               |
| Al                                 | 73,5                                | 58,3                       | 42,8                                                     | 8,1                                 | 8,5                                 | 7,7                        | 0               | 0               |
| Ti                                 | 25,4                                | 23,6                       | 29,4                                                     | 32,2                                | 40,8                                | 28,4                       | 19,7            | 17,8            |
| Cu                                 | 1,1                                 | 18,1                       | 27,8                                                     | 59,7                                | 50,7                                | 63,9                       | 80,3            | 82,2            |
| Достоверно идентифицированные фазы | $\text{TiAl}_3$                     | $\text{CuTi}_2\text{Al}_5$ | $\text{CuTi}_2\text{Al}_5$ ,<br>$\text{Al}_4\text{Cu}_9$ | $\text{Ti}_2\text{Cu}_3(\text{Al})$ | $\text{Ti}_3\text{Cu}_4(\text{Al})$ | $\text{TiCu}_2(\text{Al})$ | $\text{TiCu}_4$ | $\text{TiCu}_4$ |