В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, В. П. Кулевич

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ЗОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, СФОРМИРОВАННОЙ В КОМПОЗИТЕ СИСТЕМЫ Ti-Cu В ПРИСУТСТВИИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Показано, что термообработка композитов системы Ti-Cu при температуре выше температуры плавления меди (медноникелевого сплава) приводит к формированию зоны взаимодействия, структура и фазовый состав которой определяются температурой и временем существования контактирующего с прослойкой твердого раствора жидкого расплава. При прочих равных условиях увеличение времени выдержки приводит к росту объема прореагировавшего титана и весовой доли богатых титаном интерметаллидов в ее структуре.

Ключевые слова: плавление, зона взаимодействия, фазовый состав, интерметаллиды.

V. G. Shmorgun, O. V. Slautin, A. G. Serov, V. P. Kulevich

PHASE COMPOSITION OF THE INTERACTION ZONE FORMED IN THE Ti-Cu SYSTEM COMPOSITE IN THE PRESENCE OF A LIQUID PHASE

Volgograd State Technical University

It was shown that heat treatment of Ti-Cu system composites at temperatures above the melting temperature of copper (copper-nickel alloy) leads to the formation of an interaction zone, the structure and phase composition of which is determined by the temperature and time of existence of the liquid melt solid solution in contact with the interlayer. Other things being equal, an increase in the exposure time leads to an increase in the volume of reacted titanium and the weight fraction of titanium-rich intermetallic compounds in its structure.

Keywords: melting, interaction zone, phase composition, intermetallic compounds.

Введение

По данным ранее выполненных исследований [1–3] при создании металло-интерметаллических СКМ добиться значительного увеличения интенсивности диффузионных процессов на их межслойных границах [4], можно за счет проведения термообработки (ТО) при температурах выше температуры эвтектического превращения [5].

В настоящей работе исследована структура и фазовый состав зоны взаимодействия (ЗВ), формирующейся на межслойной границе сваренных взрывом композитов BT1-0+M1, BT1-0+MN19 и BT1-0+MN45 после ТО на режимах, обеспечивающих жидкофазное взаимодействие.

Материалы и методы исследования

Материалами для исследования служили образцы сваренного взрывом титана марки (2+0,25 мм) с медно-никелевыми сплавами MN19 и MN45 (2 + 2 мм). ТО композитов проводили в печи SNOL 8.2/1100 при температуре 1100 °С с выдержкой 1–2 мин (BT1-0 + M1), 1200 °С, 2 мин (BT1-0 + MN19) и 1300 °С, 2 мин (BT1-0 + MN45). Образцы располагались внутри камеры титановым слоем вниз, охлаждение проводилось на воздухе.

Количественный и фазовый состав зоны взаимодействия (ЗВ) оценивали при сопоставлении данных, полученных с помощью дифрактометра Bruker D8 Advance и растрового двухлучевого электронного микроскопа системы Versa 3D.

Результаты и их обсуждения

Металлографические исследования ЗВ на межслойной границе биметалла ВТ1-0+М1 после ТО 1100 °С, 1 мин показали, что произошло расплавление медного слоя и формирование ЗВ

(рис. 1) толщиной ~400 мкм. С помощью энергодисперсионного (табл. 1, 2) и рентгеноструктурного (рис. 4) анализа установлено, что фазовый состав ЗВ: $TiCu_4$, $TiCu_3$ и Ti_2Cu_3 .

Рис. 1. СЭМ-изображение ЗВ в композите ВТ1-0+М1 после ТО 1100 °С, 1 мин

Таблица 1

Результаты определения элементного состава в ЗВ после ТО по режиму 1100 °С, 1 мин (I – рис. 1)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат.%			
	1	2	3	4
Ti	17,61	30,48	20,74	39,03
Cu	65,7	69,52	79,26	60,97
N	3,11	–	–	–
O	13,58	–	–	–
Фаза	оксид, нитрид	$TiCu_3$	$TiCu_4$	Ti_2Cu_3

Таблица 2

Результаты определения элементного состава в ЗВ после ТО по режиму 1100 °С, 1 мин (II– рис. 1)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат.%						
	1	2	3	4	5	6	7
Ti	30,15	41,07	20,73	41,85	49,27	91,3	100
Cu	69,85	58,93	79,27	58,15	50,73	8,7	–
Фаза	$TiCu_3$	Ti_2Cu_3	$TiCu_4$	Ti_2Cu_3	$TiCu$	$Ti(Cu)$	Ti

С увеличением времени выдержки до 2 минут происходит изменение стехиометрического состава структурных составляющих в ЗВ (рис. 2, табл. 3, 4), что связано с увеличением доли про-

реагировавшего титана с 30 до 70 % (рис. 2 и 3). Установлено, что в ЗВ образуются интерметаллиды с высоким содержанием титана (идентифицированы фазы $TiCu$ и Ti_2Cu) (рис. 4).

Рис. 2. СЭМ-изображение ЗП в СКМ ВТ1-0+М1 после ТО 1100 °С, 2 мин

Таблица 3

Результаты определения элементного состава в ЗВ после ТО по режиму 1100 °С, 2 мин (I – рис. 2)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат.%		
	1	2	3
Ti	66,13	50	53,69
Cu	33,87	50	17,45
N	–	–	15,02
O	–	–	17,45
Фаза	Ti_2Cu	$TiCu$	оксид, нитрид

Таблица 4

Результаты определения элементного состава в ЗВ после ТО по режиму 1100 °С, 2 мин (II – рис. 2)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат.%				
	2	1	3	4	5
Ti	66,31	50,12	58,65	91,7	100
Cu	33,69	49,88	8,64	8,3	–
N	–	–	13,78	–	–
O	–	–	18,92	–	–
Фаза	Ti_2Cu	$TiCu$	оксид, нитрид	$Ti(Cu)$	Ti

Рис. 3. Распределение химических элементов в 3В композита M1+BT1-0 после ТО 1100 °С, 1 и 2 мин

Рис. 4. Дифрактограммы 3В в композите M1+BT1-0 после ТО 1100 °С, 1 (а) и 2 (б) мин

Исходя из полученных экспериментальных данных можно предположить, жидкофазное взаимодействие на границе «расплав меди – титан» осуществляется в соответствии с представлениями, изложенными в работах [6–9]. В начальный момент времени на границе «расплав меди – титан» формируется зона твердофазного взаимодействия в виде интерметаллидных прослоек. Выделенная на реакционной поверхности теплота экзотермической реакции формирования интерметаллидных прослоек

увеличивает температуру продуктов реакции и контактирующего с ними расплава меди, что приводит к возникновению градиента температур и конвективных потоков расплава. Циркулирующие потоки расплава в восходящем направлении транспортируют отделившиеся фрагменты ближайших к расплаву меди интерметаллидных прослоек от зоны реакции. С увеличением времени выдержки интерметаллид не успевает образовываться на межслойной границе и жидкий расплав контактирует непосред-

ственно с прослойкой твердого раствора, через которую и осуществляется диффузия атомов титана в жидкий расплав. Объем прореагировавшего титана увеличивается, что, соответственно, ведет и к изменению его распределения по сечению зоны взаимодействия.

Для изучения влияния легирования никелем на структуру и фазовый состав ЗВ проводили ТО образцов с плакировкой из сплавов МН19 и МН45.

Металлографический анализ структуры сформированных ЗВ позволил установить, что они отличаются от ЗВ, сформированной в бинарной системе Ti-Cu фазовым составом.

Энергодисперсионный и рентгеноструктурный анализ показал, что после введения в ЗВ никеля до 19 % ее фазовый состав $Ti_2Cu(Ni)$ и βTi (рис. 5, 7, табл. 5). Увеличение содержания Ni до 45 % приводит к появлению в ЗВ интерметаллида Ti_2Ni (рис. 6, 7 табл. 6).

Рис. 5. СЭМ-изображение ЗВ в композите ВТ1-0+МН19 после ТО 1200 °С, 2 мин

Таблица 5

**Результаты определения элементного состава ЗВ (рис. 5)
после ТО композита МН19+ВТ1-0 по режиму 1200 °С, 2 мин**

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат. %						
	1	2	3	4	5	6	7
Ti	66.54	83.73	66.7	87.06	90.06	96.37	100
Cu	27.66	10.54	28.54	8.66	8.15	1.19	—
Ni	5.8	5.73	4.76	4.28	1.79	2.44	—
Фаза	$Ti_2Cu(Ni)$	βTi	$Ti_2Cu(Ni)$	βTi	βTi	αTi	Ti

Таблица 6

**Результаты определения элементного состава ЗВ (рис. 6)
после ТО композита МН45+ВТ1-0 по режиму 1300 °С, 2 мин**

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат. %					
	1	2	3	4	5	6
Ti	66.85	89.08	66.66	66.85	88.36	99.47
Cu	20.33	5.3	20.6	6.96	6.11	0.32
Ni	12.83	5.63	12.74	26.19	5.54	0.21
Фаза	$Ti_2Cu(Ni)$	βTi	$Ti_2Cu(Ni)$	$Ti_2Ni(Cu)$	βTi	αTi

Рис. 6. СЭМ-изображение ЗП в СКМ ВТ1-0+МН45 после ТО 1300 °С, 2 мин

Рис. 7. Дифрактограммы ЗВ в композитах МН19+ВТ1-0 (а) и МН45+ВТ1-0 (б) после ТО

Вывод

Термообработка композитов системы Ti-Cu при температуре выше температуры плавления меди (медноникелевого сплава) приводит к формированию зоны взаимодействия, структура и фазовый состав которой определяется температурой и временем существования контактирующего с прослойкой твердого раствора жидкого

расплава. При прочих равных условиях увеличение времени выдержки приводит к росту объема прореагировавшего титана и весовой доли богатых титаном интерметаллидов в ее структуре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия : монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, О. В. Слатин, А. И. Богданов. – Москва, 2016. – 346 с.

2. Шморгун, В. Г. Комплексные технологические процессы получения слоистых интерметаллидных композиций / В. Г. Шморгун, Ю. П. Трыков, О. В. Слаутин // Конструкции из композиционных материалов. – 2005. – № 3. – С. 3–9.

3. Physical and chemical bases of reception layered metalintermetallic composites and coatings using billets welded by explosion / В. Г. Шморгун, Л. М. Гуревич, О. В. Слаутин, Д. В. Проничев, А. И. Богданов // XX Mendeleev Congress on general and applied chemistry (Ekaterinburg, Russia, 26–30 September, 2016). Five-volumes book. Vol. 2b. Chemistry and technology of materials and nanomaterials : abstracts / Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. – Ekaterinburg, 2016. – С. 107.

4. 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.

5. Шморгун, В. Г. Effect of Contact Melting Regime on

Structure and Properties of Coatings of the Copper–Titanium System / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, Д. А. Евстропов // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60, No. 5–6. – С. 635–640.

6. Slama, G. Coating of niobium and niobium alloys with aluminium. Part II. Hot-dip-ped coatings / G. Slama, A. Vignes // Journal of the Less-common Metals. 1971. № 24. – P. 1–21.

7. Sujata, M. Microstructural Features of TiAl₃ Base Compounds Formed by Reaction Synthesis / M. Sujata. S. Bhargava and S. Sangal // Materials & Design. Volume 32. Issue 1. January 2011. – P. 207–216.

8. Harach, D. J. Microstructure Evolution in Metal-Intermetallic Laminate (MIL) Composites Synthesized by Reactive Foil Sintering in Air / David J. Harach and Kenneth S. Vecchio // Metallurgical and Materials Transactions A. – V. 32A. 2001. – P. 1493–1505.

9. Shmorgun, V. G. Formation of Intermetallic Coating on 20880 Steel in the Liquid-Phase Inter-Reaction with Aluminum / V. G. Shmorgun, A. I. Bogdanov, V. P. Kulevich // Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications Ltd, 2020. – T. 299. – С. 914–919.