СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 669.716:621.785

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-4-239-7-13

В. Г. Шморгун, А. Г. Серов, О. В. Слаутин, С. А. Кузнецов, А. В. Малых

ФОРМИРОВАНИЕ ЗОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА МЕЖСЛОЙНОЙ ГРАНИЦЕ СВАРЕННОГО ВЗРЫВОМ КОМПОЗИТА ВТ1-0+МН45 ПРИ КОНТАКТНОМ ПЛАВЛЕНИИ*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Показано, что замена сплава МН19 на сплав МН45 в составе сваренного взрывом слоистого композита титан-медноникелевый сплав приводит: к понижению температуры, при которой жидкость (расплавленный при контактном плавлении металл) находится в равновесии с твердыми фазами, с 930 °C ($L \leftrightarrow \text{TiCuNi} + \text{NiTi} + \text{CuTi}$) до 860 °C ($L \leftrightarrow \text{Ti}_2\text{Cu} + \text{NiTi} + \text{Ti}_2\text{Ni}$); смене механизма контактного плавления с бездиффузионного на диффузионный; увеличению доли титана в зоне взаимодействия с ~50 ат.% до ~66 ат.%. Развитие процесса контактного плавления на межслойной границе слоистого композита ВТ1-0+МН45 после трансформации твердого раствора в пленку жидкой фазы приводит к формированию зоны взаимодействия с фазовым составом TiCuNi , $\text{TiNi}(\text{Cu})$, $\text{TiCu}(\text{Ni})$, $\text{Ti}_2\text{Ni}(\text{Cu})$, $\text{Ti}_2\text{Cu}(\text{Ni})$. Со стороны сплава МН45 к ней примыкает сплошная прослойка тройного интерметаллида TiCuNi , а со стороны титана – $\alpha\text{Ti} + \text{Ti}_2\text{Ni}(\text{Cu})$.

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

V. G. Shmorgun, A. G. Serov, O. V. Slautin, S. A. Kuznetsov, A. V. Malykh

FORMATION OF THE INTERACTION ZONE AT THE INTERLAYER BOUNDARY OF THE EXPLOSION-BOILED COMPOSITE VT1-0 + MH45 IN CONTACT MELTING*

Volgograd State Technical University

It is shown that the replacement of the MH19 alloy with the MH45 alloy in the explosion-welded layered titanium-copper-nickel composite leads to a decrease in the temperature at which the liquid (metal melted by contact melting) is in equilibrium with the solid phases from 930 °C ($L \leftrightarrow \text{TiCuNi} + \text{NiTi} + \text{CuTi}$) up to 860 °C ($L \leftrightarrow \text{Ti}_2\text{Cu} + \text{NiTi} + \text{Ti}_2\text{Ni}$); to a change in the mechanism of contact melting from diffusion to diffusion; to increase the proportion of titanium in the interaction zone from ~ 50 at.% to ~ 66 at.%. The development of the contact melting process at the interlayer boundary of the VT1-0 + MH45 layered composite after the solid solution is transformed into a liquid phase film leads to the formation of an interaction zone with the phase composition TiCuNi , $\text{TiNi}(\text{Cu})$, $\text{TiCu}(\text{Ni})$, $\text{Ti}_2\text{Ni}(\text{Cu})$, $\text{Ti}_2\text{Cu}(\text{Ni})$. On the side of the MH45 alloy, a continuous layer of the ternary intermetallic TiCuNi adjoins it, and on the titanium side, $\alpha\text{Ti} + \text{Ti}_2\text{Ni}(\text{Cu})$.

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

Введение

Основным недостатком бинарных купридов титана является низкотемпературная хрупкость при комнатной температуре [1]. В работе [2] показано, что легирование купридов титана никелем (15–20 %) приводит к увеличению их пластичности. Результаты первых исследований, посвященных выявлению влияния никеля на кинетику диффузионных процессов в слоистых композитах системы Ti-Cu-Ni, а также определению химического и фазового состава зон диффузионного взаимодействия (ЗВ), формирующихся в присутствии жидкой фазы, изложены в работе [3]. Материалом для исследования служили образцы сваренного взрывом титана марки ВТ1-0 с медно-никелевым сплавом МН19. В настоящей работе исследована структура и фазовый состав ЗВ, формирующейся на

стих композитах системы Ti-Cu-Ni, а также определению химического и фазового состава зон диффузионного взаимодействия (ЗВ), формирующихся в присутствии жидкой фазы, изложены в работе [3]. Материалом для исследования служили образцы сваренного взрывом титана марки ВТ1-0 с медно-никелевым сплавом МН19. В настоящей работе исследована структура и фазовый состав ЗВ, формирующейся на

межслойной границе сваренного взрывом композита ВТ1-0+МН45 после термообработки (ТО) на режимах, обеспечивающих жидкофазное взаимодействие.

Материалы и методы исследования

Материалами для исследования служили образцы сваренного взрывом титана марки ВТ1-0 с медно-никелевым сплавом МН45 (константан) (2 + 1 мм). Эксперимент проводили с помощью двух печей SNOL 8.2/1100, нагретых до температур 850 и 950 °С. Часть образцов после предварительной ТО перемещали в печь с температурой 950 °С и выдерживали при этой температуре от 1 до 3 мин. ТО образцов по режиму 950 °С, 15 мин проводили в одной печи. Образцы располагались внутри камеры титановым слоем вниз, охлаждение проводилось на воздухе.

Металлографическая часть выполнена с применением оптического микроскопа Olympus BX61, фиксирование структуры осуществлялось цифровой камерой DP-12 с последующей обработкой изображений пакетом прикладных программ AnalisyS. Количественный и фазовый состав 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+МН45 после ТО 850 °С, 50 ч + 950 °С, 1 мин показали, что со стороны сплава МН45 формируются интерметаллидные прослойки Ti_3Ni , $TiCuNi$, $TiNi$

и Ti_2Ni , а со стороны титана твердый раствор на основе αTi (рис. 1, табл. 1). После 2-минутной выдержки на месте прослойки Ti_2Ni зафиксирована смесь фаз Ti_2Ni , $TiNi$ и Ti_2Cu (рис. 3, табл. 2), что позволило сделать вывод о реализации процесса контактного плавления (КП), идущего по механизму, аналогичному описанному в работе [4]. В соответствии с изложенными в [4] представлениями, увеличение содержания Ni в $\beta-Ti$ до некоторой критической концентрации приводит к «блокированию» его отдельных малых областей «перегородками» из атомов Ni и образованию наноразмерных объемов (кластеров), на которых и проявляется размерный эффект плавления [5]. Согласно [5] в дальнейшем хаотически распределенные кластеры при соприкосновении друг с другом сливаются, образуя жидкую матрицу с отдельными твердофазными частицами $\beta-Ti$ (микрорекристаллами). Окруженные жидкостью твердые частицы растворяются, и вся область твердого раствора превращается в тонкую пленку жидкости. Поскольку системе энергетически выгодно формирование жидкой фазы при самой низкой температуре ее устойчивого существования, в начальный момент температура тонкой пленки жидкости должна быстро понизиться, а концентрация Ni в ней повыситься до эвтектической. Согласно расчетным реакциям, представленным в работах [6, 7], и данным энергодисперсионного анализа (рис. 3, табл. 2) температура тонкой пленки жидкости должна быть ~860 °С, а эвтектическая реакция выглядеть следующим образом $L \leftrightarrow Ti_2Cu + NiTi + Ti_2Ni$.

Рис. 1. Микроструктура ЗВ в биметалле МН45+ВТ1-0 после ТО по режиму 850 °С, 50 ч + 950 °С, 1 мин

Таблица 1

Результаты микроанализа химического состава в точках (рис. 1)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат.%			
	1	2	3	4
Ti	32.48	32.22	47.53	66.78
Cu	24.11	29.55	4.02	8.8
Ni	43.41	38.55	48.39	24.43
Фаза (изотермический разрез на рис. 2)	TiNi ₃ (Cu)	TiCuNi	TiNi(Cu)	Ti ₂ Ni(Cu)

Рис. 2. Изотермический разрез диаграммы состояния Ti-Cu-Ni при температуре 850 °C [4, 5]

Рис. 3. Микроструктура 3В в биметалле МН45+ВТ1-0 после ТО по режиму 850 °C, 50 ч + 950 °C, 2 мин

Таблица 2

Результаты микроанализа химического состава в точках (рис. 2)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат.%					
	1	2	3	4	5	6
Ti	33.02	32.65	46.93	66.65	55.65	65.78
Cu	24.13	37.04	4.44	18.73	4.35	23.7
Ni	42.85	30.31	48.64	14.62	39.99	10.52
Фаза (изотермический разрез)	TiNi ₃ (Cu)	TiCuNi	TiNi(Cu)	Ti ₂ Ni(Cu)	TiNi(Cu)	Ti ₂ Cu(Ni)

Дальнейшее увеличение времени выдержки, как при ступенчатой (850 °C, 50 ч + 950 °C, 3 мин) (рис. 4), так и обычной (950 °C, 15 мин) ТО (рис. 5) практически не оказывает влияния на распределение химических элементов в 3В (рис. 4, 5) и ее фазовый состав (табл. 3, 4, рис. 6). Со стороны сплава МН45 в процессе

твердофазной диффузии формируется прослойка из тройного интерметаллида TiCuNi толщиной 3–4 мкм (рис. 4, 5). 3В представляет собой мелкодисперсную структуру, состоящую преимущественно из интерметаллидов TiNi(Cu), Ti₂Ni(Cu) и Ti₂Cu(Ni). Со стороны титана формируется прослойка αTi+Ti₂Ni(Cu).

Рис. 4. Структура и распределение химических элементов в ЗВ на межслойной границе титана BT1-0 со сплавом MH45 после ТО по режиму 850 °С, 50 ч + 950 °С, 3 мин

Таблица 3

Результаты определения элементного состава ЗВ области I (рис. 3)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат.%				
	1	2	3	4	5
Ti	29.62	48.13	65.41	52.64	66.44
Cu	34.56	26.99	23.34	21.55	13.07
Ni	35.82	24.88	11.26	25.81	20.5
Фаза (изотермический разрез)	TiNi ₃ (Cu)	TiCuNi	Ti ₂ Cu(Ni)	TiNi(Cu)	Ti ₂ Ni(Cu)

Таблица 4

Результаты определения элементного состава ЗВ в области II (рис. 3)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат.%			
	1	2	3	4
Ti	66.7	66.4	87.55	87.69
Cu	6.22	22.81	5.2	5.85
Ni	27.08	10.79	7.25	6.46
Фаза (изотермический разрез)	Ti ₂ Ni(Cu)	Ti ₂ Cu(Ni)	αTi	αTi

Рис. 5. Структура и распределение химических элементов в ЗВ на межслойной границе титана BT1-0 со сплавом MN45 после ТО по режиму 950 °C, 15 мин

Таблица 5

Результаты определения элементного состава ЗВ в области I (рис. 4)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат. %			
	1	2	3	4
Ti	46.5	66.26	51.99	66.11
Cu	21.08	21.8	18.61	16.61
Ni	32.42	11.94	29.41	17.28
Фаза (изотермический разрез)	TiCuNi	Ti ₂ Cu(Ni)	TiNi(Cu)	Ti ₂ Ni(Cu)

Таблица 6

Результаты определения элементного состава ЗВ в области II (рис. 4)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат. %			
	1	2	3	4
Ti	66.56	66.65	90.28	90.71
Cu	9.76	22.11	4.5	3.33
Ni	23.68	11.24	5.22	5.96
Фаза (Изотермический разрез)	Ti ₂ Ni(Cu)	Ti ₂ Cu(Ni)	βTi	βTi

Дифрактограммы, снятые при послойной съемки поверхности ЗВ, полученной после ТО по режиму 950 °С, 15 мин представлены на рис. 6. Достоверно идентифицировали следующие фазы: TiCuNi , TiNi , TiCu , Ti_2Ni и Ti_2Cu .

Следует отметить, что большинство фаз, образование которых возможно в системе Ti-Cu-Ni , имеют близкие углы отражения 2θ , что обуславливает наложение соответствующих рефлексов на дифрактограммах.

Рис. 6. Дифрактограммы, снятые после послойной съемки (см. рис. 4) поверхности ЗВ (ТО 950 °С, 15 мин)

Рис. 7. Влияние выдержки при 950 °С на абсолютное (а) и относительное (б) изменение толщины BT1-0 и MN45

Анализ микроструктуры ЗВ, образующейся на границе МН45+ВТ1-0 после термообработки при 950 °С и временном диапазоне выдержек от 5 до 30 мин показал, что ее толщина меняется от 0,3 (5 мин), до ≈ 2,5 мм (1 ч) (рис. 7). Удель-

ный объем Cu(Ni) и Ti в ЗВ, определенный по доле прореагировавших слоев (потеря толщины относительно исходных значений после сварки), лежит в интервале 0,67-0,80 для Ti и 0,20-0,33 для МН45.

Рис. 8. Структура и распределение химических элементов в ЗВ на межслойной границе титана ВТ1-0 со сплавом МН19 после ТО по режиму 950 °С, 15 мин [8]

Сопоставление полученных экспериментальных данных с данными, представленными в работе [2], показал, что замена сплава МН19 на сплав МН45 в составе слоистого композита титан-медноникелевый сплав приводит к понижению температуры, при которой жидкость (расплавленный при контактном плавлении металлов) находится в равновесии с твердыми фазами с 930 °С ($L \leftrightarrow TiCuNi + NiTi + CuTi$) до 860 °С ($L \leftrightarrow Ti_2Cu + NiTi + Ti_2Ni$), к смене механизма КП с бездиффузионного [2, 9] на диффузионный [5], и к увеличению доли титана в ЗВ с ~50 ат. % (рис. 8) до ~66 ат. % (рис. 5).

Выводы

1. Замена сплава МН19 на сплав МН45 в составе сваренного взрывом слоистого композита титан - медноникелевый сплав приводит:

- к понижению температуры, при которой жидкость (расплавленный при контактном плавлении металлов) находится в равновесии с твердыми фазами, с 930 °С ($L \leftrightarrow TiCuNi + NiTi + CuTi$) до 860 °С ($L \leftrightarrow Ti_2Cu + NiTi + Ti_2Ni$);
- смене механизма контактного плавления с бездиффузионного на диффузионный;
- увеличению доли титана в зоне взаимодействия с ~50 ат. % до ~66 ат. %.

2. Развитие процесса контактного плавления на межслойной границе слоистого композита ВТ1-0+МН45 после трансформации твердого раствора в пленку жидкой фазы приводит к формированию зоны взаимодействия с фазовым составом $TiCuNi$, $TiNi(Cu)$, $TiCu(Ni)$, $Ti_2Ni(Cu)$, $Ti_2Cu(Ni)$. Со стороны сплава МН45 к ней примыкает сплошная прослойка тройного интерметаллида $TiCuNi$, а со стороны титана – $\alpha Ti + Ti_2Ni(Cu)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колпачева, О. В. Электронная энергетическая структура тетрагональных купридов титана и сплавов Cu-Ti-Ni // автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук по специальности 01.04.07 / Колпачева О. В. – Ростов-на-Дону, 2007.
2. Шморгун, В. Г. Формирование диффузионной зоны при контактном плавлении на межслойной границе сваренного взрывом композита ВТ1-0 + МН19 / В. Г. Шморгун, А. Г. Серов, В. П. Кулевич, О. В. Слаутин, Р. Е. Новиков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (227) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 7–14.
3. Шморгун, В. Г. Химический и фазовый состав диффузионной зоны на межслойной границе сваренных взрывом соединений титана ВТ1-0 со сплавами МН19 и МН45 / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, В. П. Кулевич, Н. В. Кривченко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (225) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 7–14.
4. Шморгун, В. Г. Формирование зоны взаимодействия на межслойной границе сваренного взрывом композита ВТ1-0-НП2 / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич, А. Г. Серов // Материаловедение. – 2019. – № 5 (266). – С. 23–27.
5. Ахкубеков, А. А. Контактное плавление металлов и наноструктур: монография / А. А. Ахкубеков, Т. А. Орквасов, В. А. Созаев. – Москва : Физматлит, 2008. – 150 с.
6. Zhu, W. J. Experimental study and thermodynamic assessment of the Cu-Ni-Ti system/ W.J. Zhu, L.I. Duarte, C. Leinenbach// CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. – 2014 (December). – Vol. 47. – P. 9–22.
7. Gupta, K. P. The Cu-Ni-Ti (Copper-Nickel-titanium) system / K. P. Gupta // Journal of Phase Equilibria. –2002. – No 6. –С. 541–547.
8. Шморгун, В. Г. Структура и фазовый состав диффузионной зоны на межслойной границе титана ВТ1-0 с медно-никелевыми сплавами / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, К. С. Мансков, Н. В. Кривченко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (219) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 29–33.
9. Залкин, В. М. О двух теориях начальной стадии контактного плавления / В. М. Залкин // Расплавы. – 2004. – № 2. – С. 93–95.