

В.Г. Шморзун, О.В. Слаутин, Д.А. Евсτροφ, А.О. Таубе, Ю.И. Бондаренко

Волгоградский государственный технический университет

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛО-ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ Ti – Cu^{*}

В настоящее время интенсивно изучаются слоистые структуры для использования в целом ряде потенциальных направлений: электронные устройства, броня и баллистическая защита, теплообмен, защитные покрытия и т.д. [1 – 3]. Последние два десятилетия существенно вырос интерес к слоистым металл-интерметаллидным композитам (СМИК), поскольку интерметаллиды как отдельный класс материалов обладают уникальными свойствами (высокой стойкостью к окислению и коррозии, высокой температурой плавления, высокой твердостью и жесткостью [3 – 5]).

Существуют различные способы получения слоистых композитов: сварка взрывом, пакетная прокатка, диффузионная сварка, магнетронное распыление, электронно-лучевое испарение, лазерное легирование, вакуумное плазменное напыление, реакции синтеза между разнородными элементами металлической фольги.

Сварка взрывом по сравнению с другими методами имеет очевидные преимущества; это связано с легкостью получения и обработки слоистых композитов. При получении многослойного композита этим методом пластины одного металла чередуют с пластинами другого металла, причем размеры и количество слоев ограничены лишь соответствующим сортаментом. Используя промежуточные операции прокатки и штамповки, можно изготовить композит, близкий к заданной форме. Заключительная термическая обработка за счет «сквозной» диффузии обеспечивает получение слоистого металл-интерметаллидного композита.

Целью настоящей работы являлось исследование структуры и механических свойств медно-титановых слоистых металлических и металл-интерметаллидных композитов.

Исследования структуры и химического со-

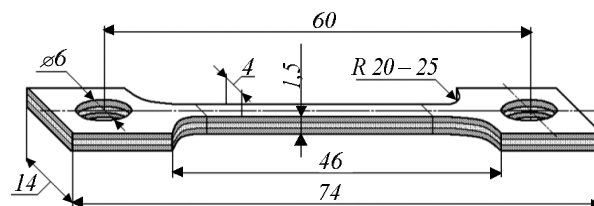


Рис. 1. Образец для механических испытаний

става выполнены с применением оптической (микроскоп Olympus BX61), растровой (установка Versa 3D Dual Beam) электронной микроскопии и анализа диаграммы состояния системы медь – титан [6 – 8].

Механические испытания при комнатной температуре проводили на установке LRK 5 Plus, высокотемпературные (до 700 °С) – на установке АЛ-ТОО (ИМАШ 20-75). Образцы толщиной 1,5 мм изготавливали из меди М1, титана ВТ1-0 и полученного сваркой взрывом с последующей прокаткой слоистого композита (СКМ) М1 + ВТ1-0 + М1 (толщина слоя меди 0,45 мм, слоя титана 0,6 мм, слоя меди 0,45 мм) (рис. 1). Нагрев образцов осуществляли радиационным методом.

Отжиг СКМ для формирования структуры СМИК медь – диффузионная зона проводили при температуре 850 °С в течение 1 – 100 ч, что позволило в итоге получить диффузионную зону с объемной долей до 75 %.

Анализ результатов металлографических исследований позволил установить следующее.

Структура сформировавшихся при сварке взрывом участков оплавленного металла представляет собой механическую смесь меди и интерметаллидных включений с микротвердостью 6,1 ГПа. Состав включений близок к следующему: 77 – 79 % Cu и 18 – 21 % Ti; это соответствует интерметаллиду $TiCu_4$.

Формирование диффузионной зоны при термической обработке сваренного взрывом (рис. 2, а) медно-титанового СКМ происходит поэтапно и начинается с образования на границе раздела слоев интерметаллидной прослой-

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.В37.21.1847) и грантов РФФИ (13-08-00066 А, 13-08-97025 р_поволжье_а, 12-08-33017 мол_а_вед).

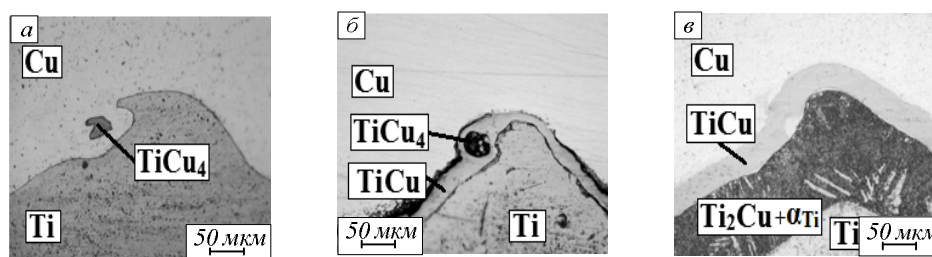


Рис. 2. Трансформация участка локального оплавления (а) после термической обработки при 850 °С в течение 1 ч (б) и 5 ч (в)

ки TiCu (рис. 2, б). После выдержки в течение 5 ч в составе диффузионной зоны были обнаружены две интерметаллидные прослойки TiCu и Ti₂Cu, причем участок ранее идентифицированного оплавленного металла перестал дифференцироваться в слое TiCu (рис. 1, в). Выдержка в течение 10 ч привела к формированию на границе соединения многослойной структуры (рис. 3) суммарной толщиной 110 мкм, включающей в себя твердый раствор титана в меди, твердый раствор меди в титане с интерметаллидом Ti₂Cu и интерметаллидные прослойки TiCu и Ti₃Cu₄ (рис. 3, в, г).

Результаты микроанализа химического состава приведены в таблице.

Дальнейшее увеличение времени термической обработки привело к росту суммарной толщины диффузионной зоны и формированию структуры СММК в виде чередующихся медных и интерметаллидных слоев (рис. 4).

Результаты механических испытаний показали (рис. 5), что температурная зависимость

прочности трехслойного СКМ подчиняется правилу смеси

$$\sigma_{\text{СКМ}} = \sigma_{\text{Cu}} V_{\text{Cu}} + \sigma_{\text{Ti}} V_{\text{Ti}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{СКМ}}$, σ_{Cu} и σ_{Ti} – предел прочности СКМ, меди и титана; V_{Cu} и V_{Ti} – объемная доля меди и титана.

Относительное удлинение (8 %) СКМ оказалось значительно ниже, чем исходных материалов (меди М1 – 20 % и титана ВТ1-0 – 30 %).

С ростом температуры испытаний прочность СММК понижается, однако ее значения выше прочности монометаллов и СКМ. При этом СММК разрушается во всем температурном диапазоне испытаний хрупко ($\delta = 0,4 \div 0,5 \%$).

В работах [9, 10] показано, что, если одна из составляющих слоистого композита хрупкая, то прочность композита можно оценить по уравнению

$$\sigma_{\kappa} = \sigma'_a V_a + \sigma'_b V_b + \sigma_c V_c, \quad (2)$$

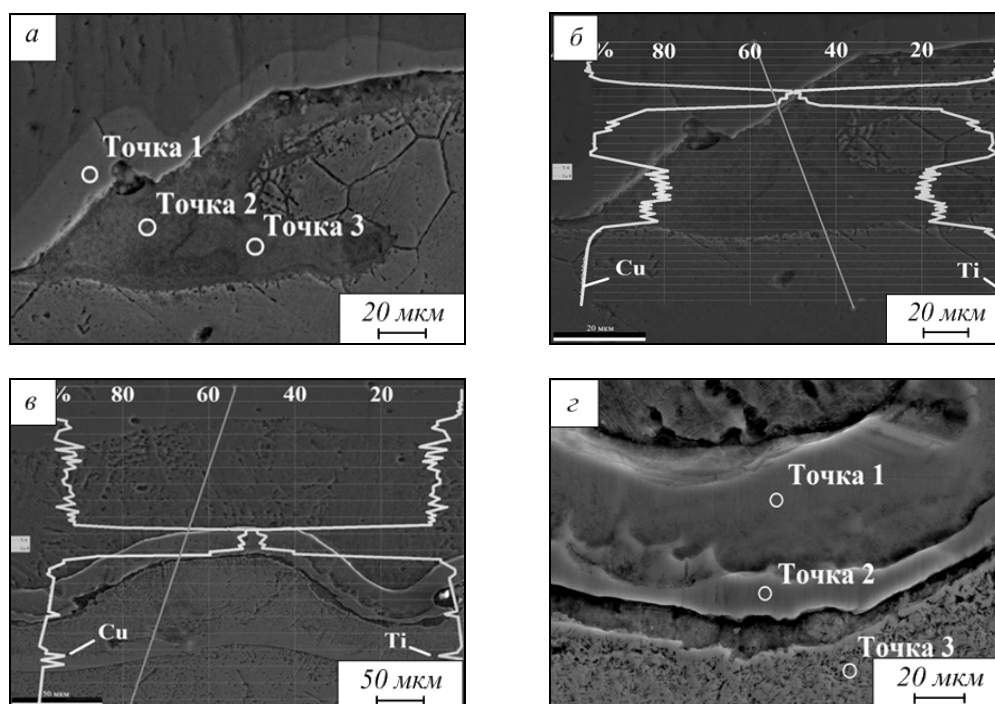


Рис. 3. Микроструктура (а, в) диффузионной зоны и характер распределения химических элементов (б, г) после термической обработки при 850 °С в течение 1 ч (а, б) и 10 ч (в, г)

Результаты микроанализа химического состава материала в различных точках после отжига

Длительность, ч	Точка	Элемент	Количество		Погрешность, %	Фаза
			% (по массе)	% (атом.)		
1	1	Ti	39,93	47,71	1,60	TiCu
		Cu	60,07	53,29	1,43	
	2	Ti	0,69	0,91	5,05	Cu
		Cu	99,31	99,09	0,94	
	3	Ti	17,01	21,38	1,89	TiCu ₄
		Cu	82,99	78,62	1,16	
10	1	Ti	42,21	49,21	1,54	CuTi
		Cu	57,79	50,79	1,51	
	2	Ti	34,69	41,33	1,63	Ti ₃ Cu ₄
		Cu	65,31	58,67	1,4	
	3	Ti	4,42	5,78	2,28	Тв. р.
		Cu	95,58	94,22	0,99	

где σ'_a и σ'_b – напряжения в мягких составляющих при деформации разрушения реакционной зоны.

Использование уравнения (2) и экспериментальных данных по прочностным свойствам СММК системы Ti – Cu позволило косвенным методом оценить прочность диффузионной зоны

$$\sigma_{дз} = \frac{\sigma_{СМК} - \sigma'_{Cu} V_{Cu}}{V_{дз}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{дз}$ и $\sigma_{СМК}$ – прочность диффузионной зоны и слоистого интерметаллидного композита; σ'_{Cu} и σ'_{Ti} – предел текучести меди и титана; $V_{дз}$ – объемная доля диффузионной зоны.

На рис. 6 представлены полученные расчетным путем средние значения прочности диффузионной зоны, сформированной при температуре 850 °С в течение 100 ч. Согласно полученным данным прочность диффузионной зоны при комнатной температуре составляет примерно 490 МПа. С повышением темпера-

туры испытания прочность постепенно уменьшается, но значительно выше прочности исходных монометаллов.

Выводы. Структура участков оплавленного металла на межслойной границе сваренного взрывом слоистого композита медь марки М1–титан ВТ1-0 представляет собой механическую смесь меди и интерметаллидных включений TiCu₄. Диффузионные прослойки, формирующиеся при температуре интенсивной диффузии (850 °С), на первом этапе повторяют контур оплава, а затем по мере увеличения времени выдержки «поглощают» его, выравнивая стехиометрический состав: со стороны меди образуется интерметаллид TiCu, со стороны титана – Ti₂Cu. Фазовый состав диффузионной зоны зависит от продолжительности высокотемпературного воздействия. При малом (1 – 5 ч) времени выдержки в составе диффузионной зоны наряду с твердыми растворами на основе меди и титана обнаружены две прослойки с фазовым составом Ti₂Cu и TiCu. При увеличении времени термической обработки до 10 ч идентифицируется сплошная прослойка с фазо-

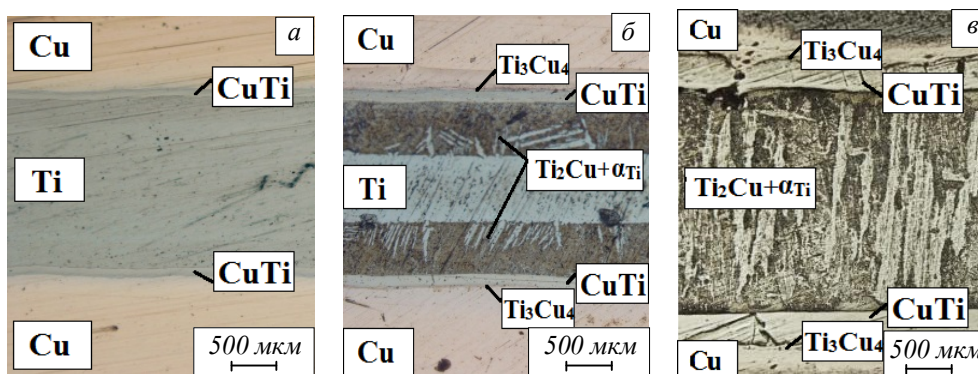


Рис. 4. Трансформация структуры СКМ после термической обработки при 850 °С в течение 1 ч (а), 60 ч (б) и 100 ч (в)

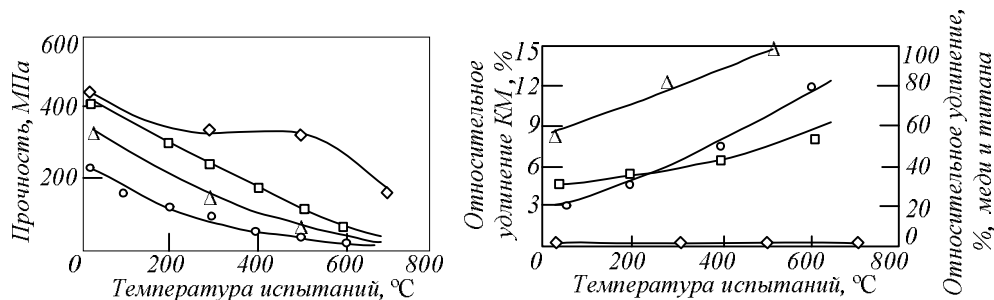


Рис. 5. Температурная зависимость прочности (а) и относительного удлинения (б) титана BT1-0 (□), меди M1 (○), СКМ M1 + BT1-0 + M1 (Δ) и СИК (◇)

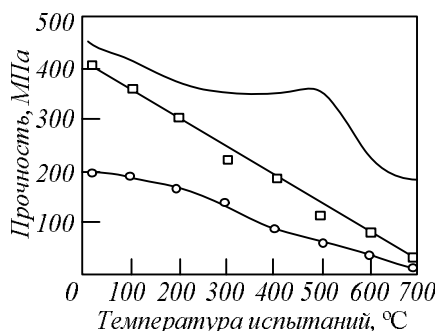


Рис. 6. Зависимость прочности меди (○), титана (□) и диффузионной зоны (—) от температуры испытаний

вым составом Ti_3Cu_4 . Прочность диффузионной зоны слоистого металл-интерметаллидного композита системы Ti – Cu, сформированного при температуре 850 °C в течение 100 ч, с повышением температуры испытания от 20 до 700 °C постепенно снижается с 420 до 200 МПа, разрушение во всем исследованном температурном диапазоне хрупкое ($\delta = 0,4 \div 0,5$ %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. K o n i e c z n y M. Processing and structure of laminated iron-intermetallics composites // Arcives of foundry engineering. 2008. Vol. 8. P. 71 – 76.
2. Reza Bateni M., Szpunar J.A., Ashrafizadeh F., Zandrahimi M. The effect of novel Ti – Cu intermetallic compound coatings on tribological properties of copper // Materials of national tribology conference. 2003. September. P. 55 – 62.
3. Трыков Ю.П., Шморгун В.Г., Гуревич Л.М. Научные основы проектирования и изготовления нового класса конструкционных материалов – слоистых интерметаллидных композитов // Конструкции из композиционных материалов. 2006. № 4. С. 133, 134.
4. K o n i e c z n y M. Mechanical properties and deformation behavior of laminated titanium-intermetallic composites synthesized using Ti and Cu foils // Kovove Mater. 2010. Vol. 48. P. 47 – 53.
5. Морозова Е.А., Муратов В.С. Лазерное легирование поверхности титана хромом и медью // Фундаментальные исследования. 2007. № 8. С. 64, 65.
6. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник в 3 т. Т. 2. / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с.
7. Bateni M.R., Ashrafizadeh F., Mirdamadi S., Szpunar J.A., Drew R.A. Formation of Ti – Cu Intermetallic Coatings On Copper Substrate // Materials & Manufacturing processes. 2001. Vol. 16 (2). P. 219 – 228.
8. Turchanin M.A., Agraval P.G., Abdulov A.R. Thermodynamic assessment of the Cu – Ti – Zr system. I. Cu – Ti system // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2008. Vol. 47. P. 334 – 360.
9. Шморгун В.Г., Трыков Ю.П., Самарский Д.С., Богданов А.И. Расчетная оценка прочности слоистых интерметаллидных композитов (СИК) системы «магний – алюминий». – В кн.: Известия ВолгГТУ. Межвуз. сб. науч. ст. № 11 (59). – Волгоград: изд. ВолгГТУ, 2009. С. 20 – 23.
10. Трыков Ю.П., Курасова Н.Н., Пектемиров Б.Г., Еловенко А.И., Ярошенко А.П. О влиянии поверхности раздела на прочность слоистого композита. – В кн.: Металловедение и прочность материалов. Межвуз. сб. науч. тр. – Волгоград: изд. ВолгПИ, 1989. С. 92 – 97.

© 2014 г. В.Г. Шморгун, О.В. Слаутин,
Д.А. Евстропов, А.О. Таубе,
Ю.И. Бондаренко
Поступила 18 декабря 2013 г.