УДК 621.793.79

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-6-253-18-26

*В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич, А. А. Артемьев, В. О. Харламов, О. М. Чукова***ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СЛОИСТЫХ
МЕТАЛЛО-ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ Cu-Al*****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: mv@vstu.ru

Приведены результаты испытания на износ СМИК системы медь–алюминий под углом воздействия абразива относительно металл-интерметаллидных слоев – 0, 45 и 90°. Показано, что износостойкость СМИК в 3,2–3,3 раза выше, чем алюминия АД1. При этом наилучшие показатели износостойкости у образцов при воздействии абразива на слоистую структуру испытанных СМИК под углом 45°.

Анализ поверхностей износа, полученных при трении во всех направлениях по отношению к слоям СМИК, позволил выявить в конгломерате все основные морфологические типы частиц износа. Показано, что дополнительное насыщение вдавливаемыми частицами твердых фаз (интерметаллида или абразива) мягких металлических слоев способствует выполнению принципа Шарпи.

Ключевые слова: износостойкость, алюминиды меди, сварка взрывом, термообработка, диффузия.

*V. G. Shmorgun, O. V. Slautin, V. P. Kulevich, A. A. Artemiev, V. O. Kharlamov, O. M. Chukova***STUDY OF WEAR RESISTANCE OF THE Cu-Al SYSTEM
LAYERED METAL-INTERMETALLIDE COMPOSITES*****Volgograd State Technical University**

The results of wear testing of the SMIC of the copper-aluminum system at the angle of action of the abrasive relative to the metal-intermetallic layers - 0, 45 and 90° are given. It is shown that the wear resistance of SMIC is 3.2 ÷ 3.3 times higher than that of AD1 aluminum. At the same time, the samples showed the best indicators of wear resistance when the abrasive was applied to the layered structure of the tested SMIC at an angle of 45°.

Analysis of the wear surfaces obtained by friction in all directions with respect to the layers of the SMIC made it possible to identify all the main morphological types of wear particles in the conglomerate. It is shown that additional saturation of the hard phases (intermetallic or abrasive) with pressed particles of soft metal layers contributes to the implementation of the Charpy principle.

Keywords: wear resistance, copper aluminides, explosion welding, heat treatment, diffusion.

Введение

Определяющим для износостойких материалов является выполнение классического требования – наличие твердой составляющей, которая обеспечивает общую стойкость к истиранию при трении, и мягкой, которая нивелирует динамические воздействия (принцип Шарпи) [1]. В слоистых металлических структурах такой подход можно реализовать в виде высокотвердых тонких интерметаллидных слоев в составе слоистых металл-интерметаллидных композитов (СМИК) [2, 3, 4].

В работах [5, 6] по результатам склерометрических исследований покрытий на основе купридов алюминия и испытаний на абразивный износ показано, что относительная износостойкость, рассчитанная по отношению глубин проседания индентора в поверхность алюминия и в поверхность покрытий, состав-

ляет, соответственно, 7 (при комнатной температуре) и 20 (при 400 °С), а стойкость к абразивному износу при комнатной температуре в 1,4–1,7 раз превышает износостойкость алюминиевой основы [5].

Исследования по определению износостойкости СМИК проводились только на системе титан–железо [4], причем вопросы анизотропии расположения слоев по направлению к воздействию частиц абразива не рассматривались. Испытания выполняли только в условиях перпендикулярного воздействия абразива по отношению к чередующимся металлическим (Fe) и интерметаллидным (Fe-Ti) слоям.

В настоящей работе исследована износостойкость СМИК системы медь–алюминий в направлении перпендикулярно, параллельно чередующимся металлическим и интерметаллидным слоям и под углом 45°.

© Шморгун В. Г., Слаутин О. В., Кулевич В. П., Артемьев А. А., Харламов В. О., Чукова О. М., 2021.

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

Материалы и методы исследования

Девятислойный композит с толщинами слоев меди и алюминия 2 мм был получен методом сварки взрывом на режиме, обеспечивающем его трансверсальную прочность (100–110 МПа). Получение девятислойных композитов предусматривало одновременную сварку предварительно полученных 2 и 3-слойных композитов соответствующего сочетания, причем соединение происходило по однородному металлу – алюминию АД1, что гарантировало хорошую свариваемость на всех границах. После зачистки толщина внешних алюминиевых слоев составляла $0,49 \pm 0,51$ мм. Перед сваркой 9-слойного композита, 2 и 3-слойные листы подвергали промежуточной прокатке с суммарной степенью обжатия 25–30 % и отжигу (250 °С, 1ч). Образцы прокатывали на двухвалковом стане «ДУО» с одинаковыми скоростями вращения валков диаметром 130 мм без натяжения и правки. Степень обжатия за один проход составляла около 8–12 %, скорость прокатки – 1 м/с. После прокатки толщина слоев меди составила 0,42–0,46 мм, толщина алюминия – 0,30–0,35 мм.

Термообработка (ТО) девятислойных медно-алюминиевых композитов (рис. 1, а) в печи SNOOL 8.2/1100 при температуре 530 °С с выдержкой 120 ч обеспечила формирование меж-

ду медными и алюминиевыми слоями диффузионной зоны (ДЗ), состоящей из интерметаллидов CuAl_2 : 32–34 ат. % Cu и 66–68 ат. % Al; CuAl : 49–51 ат. % Cu и 49–51 ат. % Al; Cu_4Al_3 : 56–58 ат. % Cu и 42–44 ат. % Al и Cu_3Al_2 : 37–41 ат. % Cu и 59–63 ат. % Al (рис. 1, б). Твердость ДЗ составила 9–9,5 ГПа. Толщина медных слоев после ТО уменьшилась до 0,25–0,28 мм. Объемная доля интерметаллидов составила ≈ 55 %. (рис. 1).

Испытания на абразивный износ проводили на установке (рис. 2, а), предназначенной для испытания материалов на изнашивание о закрепленный абразив. Испытуемый образец и контр тело контактировали по схеме «палец – диск». На плоской поверхности вращающегося диска 2 крепилась абразивная бумага. Образец 1, находящийся в держателе, прижимался грузом 3 к поверхности диска (абразивной бумаги). Образцы 1 для испытаний (рис. 2, б) с размерами $3,5 \times 3 \times 10$ мм, вырезали с помощью отрезных кругов. Образцы фиксировали в зажимном устройстве 4, соединяющемся с консолью посредством шарнира, свободно вращающегося на шарикоподшипниках, и прижимали к абразивной истирающей поверхности в виде диска со шлифовальной бумагой КК19ХВ, зернистостью 4-Н (по ГОСТ Р 52381–2005) при статической нагрузке 5 Н.

а

б

Рис. 1. Микроструктура СММК системы Cu-Al (а) $\times 100$ и распределение химических элементов по толщине (б). Линия сканирования указана на микроструктуре (а)

Методика эксперимента предусматривала расположение образцов (1) в зажимном устройстве (4) в трех вариантах направления метал-

ло-интерметаллидных слоев по отношению к воздействию абразива, под углом 0°; 45° и 90° (рис. 3).

Рис. 2. Экспериментальная установка (а) и образцы (б) для испытаний на абразивное изнашивание: 1 – образец; 2 – диск с шлифовальной бумагой; 3 – груз; 4 – зажимное устройство; 5 – станина; 6 – патрон; 7 – электродвигатель; 8 – каретка; 9 – консоль

В процессе испытаний вращающий момент с электродвигателя через редуктор передается на патрон с зажатой в него истирающей диской, приводя его во вращение со скоростью 12 об/мин, синхронизированное с поступатель-

ным движением каретки, обеспечивающим радиальную подачу образца 3 мм/об. Таким образом, движение образца, сопряженное с истирающей поверхностью, осуществляется по спирали Архимеда по пути длиной 19 м.

Рис. 3. Схема расположения образцов со слоистой металло-интерметаллидной структурой по направлению к воздействию абразива под углом 0° (а); 90° (б) и 45° (в)

В качестве критерия износостойкости использовали потерю объема испытуемых образцов после их истирания:

$$\Delta V = \Delta m / \rho, \quad (1)$$

где Δm – потеря массы образцов после испытаний, измеренная на аналитических весах Shinko HTR – 220CE с точностью до 0,1 мг.; ρ – плотность материалов, вычисленная гидростатическим методом.

Электроннооптические исследования и определение химического состава осуществляли на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D Dual Beam.

Замеры микротвердости выполняли на микротвердомере ПМТ-3М.

Результаты и их обсуждение

Анализ истираемой поверхности выявил небольшие сколы и выкрошивания интерметаллидной составляющей, которые носят локальный характер и располагаются преимущественно в слоях, расположенных ближе к внешнему периметру поверхности образца (рис. 4, 5). Появления микротрещин на границе металло-интерметаллидных слоев, распространяющихся вглубь образца, и расслаиваний не обнаружено.

Поверхность образцов, истираемых под углом 0° (воздействие абразива параллельно слоям), визуально имела меньшую шероховатость (рис. 4 (а, г, ж) и 5 (а, г, ж)), что можно объяснить отсутствием пересечения границ слоев

частицами абразива Al_2O_3 и, следовательно, отделившимися хрупкими частицами интерметаллидов.

Поверхность образцов после испытаний под углом 90° по отношению к воздействию абразива визуально имеет более развитую шероховатость (рис. 4 (б, д, з) и 5 (б, д, з)).

Анализ полученных микроструктур поверхности показал, что образовавшиеся риски (треки), имеют различную глубину и ширину.

Частицы корунда из наждачной бумаги

(α -оксид алюминия, Al_2O_3) имеющие по шкале Мооса твердость – 9 (свыше 20 ГПа) оставляют треки по всей длине их воздействия на образец (рис. 6, б). Поскольку они не разрушаются, т. к. остальные структурные составляющие СМИК имеют несопоставимо меньшую твердость (для фаз системы Cu-Al, например – γ , ε , χ , твердость не превышает 12 ГПа, [7]), то глубина треков от них соответствует пройденному ими слою с соответствующим чередованием толщин самих треков.

Рис. 4. СЭМ-изображение микроструктуры СМИК системы Cu-Al в режиме обратно отраженных электронов после испытания на износ под углом воздействия абразива относительно металло-интерметаллидных слоев – 0° (а, г, ж); 90° (б, д, з); 45° (в, е, и). Увеличение: $\times 150$ (а–в); $\times 600$ (г–е); $\times 1200$ (ж–и)

Наибольшая толщина трека получена на слоях алюминия и твердого раствора на основе алюминия, меньшую толщину имеют треки на медных слоях и самую малую толщину – на слоях, состоящих из интерметаллидов (рис. 4 (б, д, з) и 5 (б, д, з)). Причем, в отличие от образцов, испытанных в направлении воздействия абразива вдоль слоев СМИК, наблюдаются фрагменты разрушения интерметаллидных слоев частицами абразива (особенно по границам с металлическими слоями) с последующим их вы-

носом в медные и алюминиевые слои (рис. 6, б). Эти частицы вносят свой вклад в образовавшийся рельеф поверхности, но в отличие от треков абразива, их треки не всегда имеют строго перпендикулярное слоям направление и они дискретны. Это обусловлено тем, что частицы интерметаллидов подвержены дроблению, в результате которого они, имея неправильную форму с острыми краями, цепляются за границы интерметаллидных слоев или вклиниваются в слои мягкого металла.

Рис. 5. СЭМ изображение микроструктуры СМИК системы Cu-Al в режиме съемки во вторичных электронах после испытания на износ под углом воздействия абразива относительно металло-интерметаллидных слоев – 0° (а, г, ж); 90° (б, д, з); 45° (в, е, и). Увеличение: $\times 150$ (б, в); $\times 600$ (а, д); $\times 1200$ (г, е, з); $\times 2400$ (ж, и)

Рис. 6. Точки определения соотношения химических элементов поверхности образцов в СМИК системы Cu-Al после испытания на износ под углом воздействия абразива относительно металло-интерметаллидных слоев – 0° (а); 90° (б); 45° (в, г). Расшифровка – в таблицах 1–4

Таблица 1

Результаты микроанализа химического состава частиц в точках (рис. 6, а)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат. %			
	1	2	3	4
Al	36,0	44,5	32,5	33,0
Cu	–	55,5	–	67,0
O	64,0	–	67,5	–
Предполагаемая фаза	Al ₂ O ₃	Cu ₄ Al ₃	Al ₂ O ₃	CuAl ₂

Таблица 2

Результаты микроанализа химического состава частиц в точках (рис. 6, б)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат. %				
	1	2	3	4	5
Al	77,2	51,9	71,7	38,8	38,9
Cu	22,8	48,1	28,3	61,2	–
O	–	–	–	–	61,1
Предполагаемая фаза	CuAl ₂	CuAl	CuAl ₂	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃

Таблица 3

Результаты микроанализа химического состава частиц в точках (рис. 6, в)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат. %				
	1	2	3	4	5
Al	1,0	41,8	45,2	40,8	97,9
Cu	98,5	58,2	–	–	2,1
O	0,5	–	54,8	59,2	–
Предполагаемая фаза	Cu	Cu ₄ Al ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al

Таблица 4

Результаты микроанализа химического состава частиц в точках (рис. 6, г)

Элемент	Содержание в зоне анализа, ат. %				
	1	2	3	4	5
Al	35,1	37,4	42,2	3,9	39,4
Cu	–	–	–	96,1	–
O	64,9	62,6	57,8	–	60,6
Предполагаемая фаза	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cu(Al)	CuAl

По мере износа металлических слоев интерметаллидные слои оголяются и дробятся, что приводит к появлению треков в слоях СММК еще меньших размеров. Стоит отметить, что продукты абразивного износа слоев металла (Cu, Al) в виде частиц неправильной формы также задерживаются в крупных канавках (треках относительно большой глубины), оставленных абразивными частицами. Это явление наблюдается на всей площади исследуемой поверхности после износа.

На поверхности образцов после испытаний на износ под углом воздействия абразива 45° геометрия треков практически сохраняется по всей длине. Причем протяженность треков с дискретной длиной от разрушившихся интерметаллидов, значительно меньше. Наблюдаются частицы абразивных и интерметаллидных фаз, а также фрагменты металлической микростружки, которые удерживаются в канавках (треках), оставленных более твердыми частицами (рис. 6, в). Отличительной особенностью

поверхности износа образцов этой серии является более равномерное изнашивание слоев, составляющих СМИК, а также почти полное отсутствие процесса последующего дробления интерметаллидов, отделившихся в результате хрупкого скола соответствующего слоя.

При детальном анализе полученных СЭМ-изображений поверхностей износа (рис. 7), полученных при трении во всех направлениях по отношению к слоям СМИК, в конгломерате обнаружены все основные морфологические типы частиц износа [8, 9]. Однако, при угле 0° воз-

действия абразива относительно слоев СМИК, преимущественно частицы износа имеют форму нормального изнашивания и ламинарную; при угле 45° – появляются усталостно-блочные частицы и жесткого скольжения; при 90° , в дополнении к этим четырем типам, встречаются на поверхности сферические частицы. Отличительной особенностью таких частиц является правильная округлая форма, с гладкой текстурой поверхности (предполагается наличие в непосредственной близости от них отверстий или ямок), а их размер составляет 10–50 мкм [10].

а

б

в

г

д

е

Рис. 7. СЭМ-изображение частиц износа после испытаний СМИК системы Cu-Al на абразивное трение: а – конгломераты частиц износа ($\times 800$); б – частицы нормального изнашивания ($\times 500$); в – ламинарные частицы ($\times 600$); г – сферические частицы ($\times 1300$); д – усталостно-блочные частицы ($\times 800$); е – частицы жесткого скольжения ($\times 1200$)

Анализ полученных после испытаний на абразивное изнашивание экспериментальных данных показал, что износостойкость СМИК в 3,2–3,3 раза выше, чем у алюминия АД1 (табл.

5, рис. 8), и в 1,35–1,4 раза ниже, чем у меди М1. При этом износостойкость СМИК в 2,2–2,3 и 2,8–3,0 раза выше, чем у интерметаллидных покрытий на основе купридов алюминия [5].

Рис. 8. Потеря объема ΔV образцов после испытаний на абразивное изнашивание:

1 – алюминий АД1; 2–4 – образцы со слоистой (Cu+Al) металло-интерметаллидной структурой, испытанные по направлению к воздействию абразива под углом 0° (2); 90° (3); 45° (4); с интерметаллидным (Cu+Al) покрытием, сформированным по режиму жидко- (5) [5] и твердофазного (6) [5] взаимодействия

Таблица 5

Показатели износостойкости образцов в зависимости от направления воздействия абразива относительно чередующихся металло-интерметаллидных слоев

Направление воздействия абразива	СМИК системы Cu-Al			Медь М1	Алюминий АД1
	0°	90°	45°		
Потеря массы Δm , г	0,0374	0,0375	0,0363	0,0396	0,0343
Потеря объема, мм³	3,99	4,0	3,83	2,87	12,70

Наилучшие показатели износостойкости образцов получены при воздействия абразива на слоистую структуру испытанных СМИК под углом 45° (табл. 5, рис. 7). Их износ более равномерный в сравнении с образцами других серий.

По аналогии с «топокомпозитами» [11, 12], уменьшение толщин металло-интерметаллидных слоев в составе СМИК, при прочих равных условиях, должно нивелировать возможность образования резких границ в значениях твердости по макрообъему всего материала, тем самым демпфируя градиент жесткости разнородных слоев и позволяя повысить износостойкость слоистой системы в составе СМИК в целом.

Выводы

1. Испытания на абразивный износ показали, что износостойкость СМИК системы Cu-Al в 3,2–3,3 раза выше, чем алюминия АД1. Наилучшие показатели износостойкости образцов получены при воздействия абразива на слоистую структуру испытанных СМИК под углом 45°.

2. Анализ поверхностей износа, полученных при трении во всех направлениях по отношению к слоям СМИК, позволил выявить в конгломерате все основные морфологические типы частиц износа.

3. Дополнительное насыщение вдавливаемыми частицами твердых фаз (интерметаллида или абразива) мягких металлических слоев способствует выполнению принципа Шарпи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Charpy G. Les alliages blancs, dits antifriction. Bull. Soc. d'Encouragement pour l'Industrie Nationale. 1898. Juillet. P. 670–707 (<http://cnum.cnam.fr/CGI/fpage.cgi?BSPI.97/709/80/1693/691/700>).
2. Гуревич, Л. М. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия : монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – М. : Metallurgizdat, 2016. – 346 с.
3. Комплексные технологические процессы получения слоистых интерметаллидных композитов / В. Г. Шморгун, Ю. П. Трыков, О. В. Слаутин // Конструкции из композиционных материалов. – 2005. – Вып. 3. – С. 3–9.
4. Wear Resistance of Ti–Fe Laminar Intermetallic Composites / В.Г. Шморгун, О.В. Слаутин, А.А. Артемьев, И.В. Зорин, А.Г. Серов // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40, No. 2. – P. 122–126.
5. Оценка износостойкости интерметаллидных покрытий на основе алюминидов меди / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич, А. А. Артемьев, О. М. Чукова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (245) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 14–17.
6. Структура и свойства диффузионных покрытий систем Ti–Cu, Al–Cu и Fe–Al / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. С. Кайгородов, В. П. Кулевич // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (201) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 21–25.
7. Рябов, В. Р. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами / В. Р. Рябов. – Киев : Наукова думка, 1983. – 264 с.
8. Григорьев, А. Я. Классификация частиц износа по семантическим признакам / А. Я. Григорьев, Р. Чанг, Е.-С. Юн, КонгХ // Трение и износ. – 1999. – Т. 20. – № 2. – С. 159–166.
9. Григорьев, А. Я. Классификация частиц износа по текстуре поверхности с помощью матриц совместной встречаемости / А. Я. Григорьев, Р. Чанг, Е.-С. Юн, КонгХ. // Трение и износ. – 1998. – Т. 19. – № 5. – С. 606–615.
10. Легостаева, Е. В. Сравнительное исследование частиц износа и поверхности трения, формирующихся в процессе трения и износа неимплантированной и ионно-имплантированной стали 45 / Е. В. Легостаева, Ю. П. Шаркеев, В. А. Кукареко // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 1. – С. 59–70.
11. Воронин, Н. А. Актуальные проблемы создания топокомпозитов триботехнического назначения / Н. А. Воронин // Известия Самарского научного центра РАН, Т. 13. – № 4 (3). – 2011. – С. 695–698.
12. Воронин, Н. А. Топокомпозиты – новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения. Ч. I / Н. А. Воронин // Трение и износ. – 1999. – Т. 20. – № 3. – С. 533–544.