

*В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич, А. А. Артемьев, О. М. Чукова*  
**ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ПОКРЫТИЙ  
НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ МЕДИ\***

**Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: mv@vstu.ru

Исследована износостойкость диффузионных покрытий системы Al-Cu, полученных с использованием сварки взрывом и последующей термообработки на режимах, обеспечивающих твердо- и жидкофазное взаимодействие, произведена оценка их триботехнических характеристик при царапании и в условиях абразивного износа.

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

*V. G. Shmorgun, O. V. Slautin, V. P. Kulevich, A. A. Artem'ev, O. M. Chukova*  
**ESTIMATION OF WEAR RESISTANCE OF INTERMETALLIC  
COATINGS BASED ON COPPER ALUMINIDES**

**Volgograd State Technical University**

The wear resistance of the Al-Cu system diffusion coatings, obtained using explosion welding and subsequent heat treatment in modes providing solid and liquid-phase interaction, was investigated, and their tribotechnical characteristics were assessed during scratching and under conditions of abrasive wear.

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

**Введение**

Нанесение износостойких покрытий – хорошо известный и наиболее распространенный метод повышения триботехнических свойств

материалов. На его базе успешно реализованы различные технологические решения, позволяющие существенно улучшить качество поверхностного слоя.

---

© Шморгун В. Г., Слаутин О. В., Кулевич В. П., Артемьев А. А., Чукова О. М., 2020.

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

Проблема повышения стойкости к износу металла с высокой электро- и теплопроводностью, такому как алюминий, весьма актуальна. Технологически задача повышения износостойкости алюминиевых изделий усложняется тем, что ее решение не должно повлечь существенного снижения их функциональных свойств (высокой электро- и теплопроводности) [1, 2].

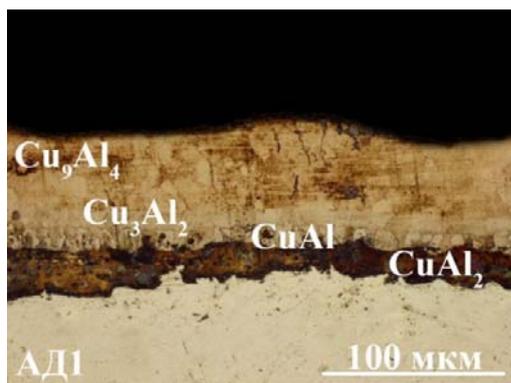
Для создания износостойких покрытий на основе интерметаллидов часто применяют комбинированные технологии, включающие операции предварительного нанесения на поверхность детали слоя металла, способного образовывать с металлом основы интерметаллидные соединения, и последующей термообработки (ТО). Применение сварки взрывом (СВ) для предварительного нанесения меди на поверхность алюминия обусловлено рядом преимуществ, основным из которых является возможность создания композиции с прочноплотным соединением сло-

ев. Последующая холодная прокатка сваренного взрывом биметалла позволяет добиваться требуемой толщины плакировки [1].

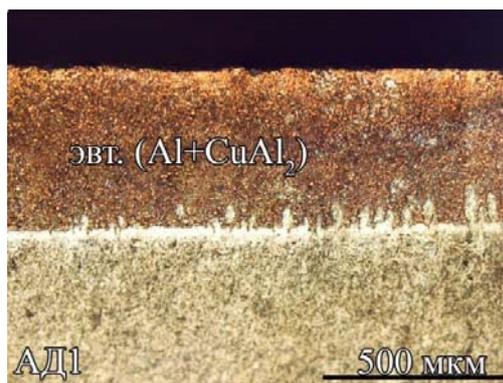
В литературе практически отсутствуют данные по износостойкости интерметаллидных покрытий системы Al-Cu, поэтому, целью данной работы явилось исследование износостойкости покрытий на основе алюминидов меди.

**Материалы и методы исследования**

В данной работе покрытия на поверхности алюминия получали при ТО сваренного взрывом алюминия АД1 (16 мм) с медью М1 (0,1 мм) по двум режимам (рис. 1). ТО при 530 °С с выдержкой 30 ч обеспечила диффузионное взаимодействие в твердой фазе. Покрытие получали после механического удаления непрореагировавшего слоя меди. Режим жидкофазного взаимодействия (580 °С, 0,25 ч), обеспечил формирование покрытия после полного растворения медного слоя.



*a*



*б*

Рис. 1. Микроструктуры покрытий системы Al-Cu, сформированных при ТО: 530 °С, 30 ч (*a*) и 580 °С, 0,25 ч (*б*)

ТО проводили в печи SNOL 8.2/1100. Металлографические исследования выполняли на модульном металлографическом микроскопе Олимпус ВХ-61. Химический состав покрытий определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа Versa 3D Dual Beam.

Царапание поверхности полученных покрытий выполняли на установке Nanotest 600 (Micro Materials Ltd., U.K.), в которой для царапания использовался конусный индентор. Режим определения износостойкости: длина сканирования (царапины) – 800 мкм; профиль нагружения показан на рис. 2; нагрузка при определении топографии поверхности – 1 мН; цикл царапания – топография (1 мН), царапина (200 мН), топография (1 мН), царапина (200 мН), топография (1 мН); температурный диапазон измере-

ний – 20 – 400 ± 0,1 °С (нагрев только образца); атмосфера – воздух; количество царапин в серии – 6.

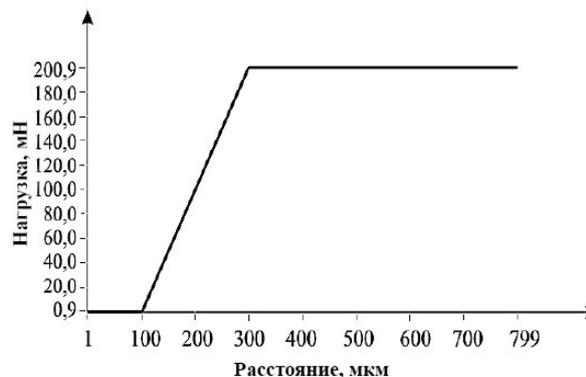


Рис. 2. Профиль нагружения образца в процессе сканирования (царапания)

Для проведения измерений использовалась плоскопараллельная геометрия образцов, что обеспечивалось их торцеванием на токарном станке. На подложку образцы крепили с помощью быстросохнущего или высокотемпературного клея (в зависимости от температуры эксперимента).

Испытания на абразивный износ проводили на установке (рис. 3, 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 (шкурки). Образцы 1 для испытаний (рис. 3, б) с размерами 3×3×10 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 КК19ХW, зернистостью 32-Н (по ГОСТ Р 52381-2005) при статической нагрузке 4,2 Н.

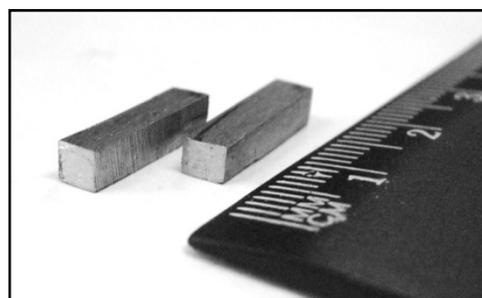
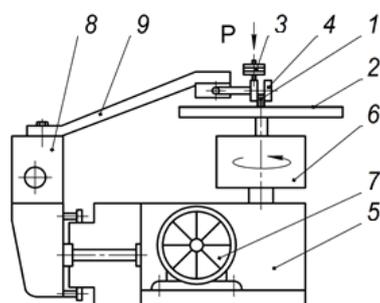


Рис. 3. Экспериментальная установка (а) и образцы (б) для испытаний на абразивное изнашивание: 1 – образец; 2 – диск с шлифовальной бумагой; 3 – груз; 4 – зажимное устройство; 5 – станина; 6 – патрон; 7 – электродвигатель; 8 – каретка; 9 – консоль

В процессе испытаний вращающий момент с электродвигателя через редуктор передается на патрон с зажатым в него истирающим диском, приводя его во вращение со скоростью 12 об/мин, синхронизированное с поступательным 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.

#### Результаты и их обсуждение

Покрытие на поверхности алюминия, полученное по режиму твердофазного взаимодействия, имело слоистую структуру. В его состав входили интерметаллидные прослойки  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{CuAl}$ ,  $\text{Cu}_3\text{Al}_2$  и  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  (рис. 1).

Покрытие на поверхности алюминия, сформированное при жидкофазном взаимодействии, толщиной ~ 450 мкм имело однородную мелкодисперсную эвтектическую структуру с небольшим количеством хлопьевидных включений у границы с алюминием (рис. 1, б). Анализ распределение химических элементов по толщине покрытия (рис. 4) показал, что на поверхности алюминия из-за мелкодисперсной эвтек-

тической структуры распределение химических элементов по толщине достаточно неоднородно, но усредненное значение концентрации элементов находится на уровне эвтектической ( $\text{CuAl}_2 + \text{Al}(\text{Cu})$ ).

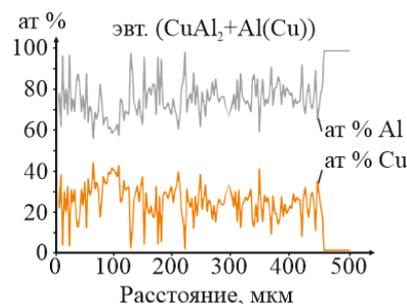


Рис. 4. Распределение химических элементов по толщине покрытий системы Al-Cu

На рис. 5 представлена общая динамика проседания индентора при царапании во всем исследованном диапазоне температур. Относительная износостойкость, рассчитанная по отношению глубин проседания индентора в поверхность алюминия и покрытия, составила, соответственно, 7 и 20. Значения глубины проседания индентора в покрытия, полученные

при ТО по режиму твердо и жидкофазного взаимодействия, практически не отличались.

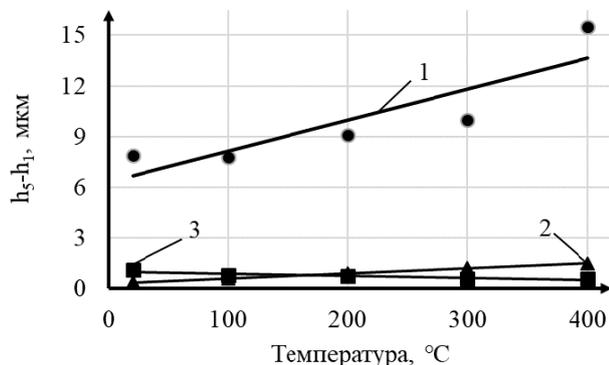


Рис. 5. Динамика проседания индентора при многократном царапании поверхности алюминия (1) и покрытий системы Al-Cu, полученных после ТО по режиму твердо- (2) и жидкофазного (3) взаимодействия

Испытания на абразивное изнашивание сформированных на поверхности алюминия покрытий показали следующее. Стойкость к абразивному износу (рис. 6) интерметаллидных покрытий в 1,4–1,7 раз превышает износостойкость алюминиевой основы. Так, потеря объема покрытия, сформированного в условиях твердофазного взаимодействия, составила 1,774 мм<sup>3</sup> (-20 %) от изначального объема (8,87 мм<sup>3</sup>), при этом потеря объема алюминиевого образца без покрытия составила 12,70 мм<sup>3</sup>. Потеря объема при абразивном износе покрытий, сформиро-

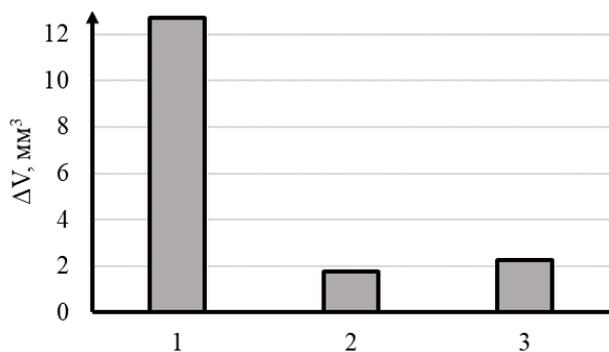


Рис. 6. Потеря объема ΔV алюминиевых (1) образцов и покрытий, сформированных после ТО по режиму жидко- (2) и твердофазного (3) взаимодействия, после испытаний на абразивное изнашивание

ванных в условиях жидкофазного взаимодействия, составила 2,27 мм<sup>3</sup> (от изначального объема – 11,35 мм<sup>3</sup>), что также составляет (-20 %).

Расхождение полученных данных с результатами царапания алмазным индентором объясняется различными механизмами деструкции поверхностных слоев материала. При трении образцов о шлифовальную бумагу наблюдается многократная пластическая деформация материала формирующихся по границам царапин бугров, в результате чего протекают процессы его упрочнения и накопления повреждений. По исчерпанию запаса пластичности данные микрообъемы материала выкрашиваются при последующем воздействии абразивных частиц. Вместе с тем, при повышении температуры испытаний следует ожидать увеличения относительной износостойкости покрытий, что косвенно подтверждают испытания при царапании в диапазоне температур 200–400 °C (рис. 6, 7).

**Вывод**

Относительная износостойкость диффузионных покрытий системы Al-Cu, полученных с использованием сварки взрывом и последующей термообработки на режимах, обеспечивающих твердо и жидкофазное взаимодействие, рассчитанная по отношению глубин проседания индентора в поверхность алюминия и в поверхность покрытий, составляет, соответственно, 7 (при комнатной температуре) и 20 (при 400 °C). Стойкость к абразивному износу интерметаллидных покрытий при комнатной температуре в 1,4–1,7 раз превышает износостойкость алюминиевой основы.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия : монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – Москва : Metallurgizdat, 2016. – 346 с.
2. Трыков, Ю. П. Теплопроводность медно-алюминиевого композита / Ю. П. Трыков, Д. В. Проничев, Л. М. Гуревич, О. В. Слаутин, А. В. Волчков // Технология металлов. – 2007. – № 7. – С. 31–35.