УДК 620.22:669

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-23-27

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

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ti – Cu, ЛЕГИРОВАННЫХ НИКЕЛЕМ*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Представлены результаты исследования износостойкости покрытий на основе купридов титана в интервале температур 20–600 °С. Показано, что износостойкость легированных никелем покрытий превышает износостойкость бинарных. При увеличении содержания Ni более 10 % их стойкость к износу повышается незначительно.

Ключевые слова: контактное плавление, покрытия, куприды титана, износостойкость, никель.

© Шморгун В. Г., Слаутин О. В., Серов А. Г., Кузнецов С. А., Артемьев А. А., 2021.

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

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

THE WEAR RESISTANCE OF THE COATING OF Ti – Cu DOPED WITH NICKEL

Volgograd State Technical University

The results of a study of the wear resistance of coatings based on cuprides of titanium in the temperature range of 20–600 °C are presented. It is shown that the wear resistance of nickel-doped coatings exceeds the wear resistance of binary coatings. With an increase in the Ni content of more than 10 %, their resistance to wear increases slightly.

Keywords: contact melting, coating, cupride titanium, wear resistance, Nickel.

Введение

Фактором, в значительной степени ограничивающим применение сплавов на основе титана, является низкий уровень триботехнических свойств, обусловленный склонностью титана к схватыванию при работе в парах трения. Одно из эффективных решений указанной проблемы – формирование на титановых изделиях поверхностных слоев с высокой износостойкостью.

Высокие показатели износостойкости имеют покрытия на основе купридов титана. Вопросы формирования таких покрытий посвящены работы [1–13 и др.]. Их анализ показал, что для получения покрытий системы Ti-Cu наиболее перспективными являются комбинированные технологии, предусматривающие предварительное нанесение меди на поверхность титана и последующее термическое воздействие при температурах либо ниже точки плавления меди (медного сплава) – диффузионный отжиг по режиму контактного плавления [12–15], либо выше – лазерная обработка [3, 16–19]. При этом основным недостатком получаемых по этим технологиям бинарных купридов титана является их низкая стойкость к термоциклированию. В работах [20, 21 и др.] показано, что введение никеля в состав покрытия позволяет не только улучшать их механические свойства, но и дает возможность использовать некоторые уникальные механизмы, действующие при формировании структуры только в многофазных сплавах.

В литературе практически отсутствуют сведения о влиянии химического состава легированных никелем покрытий на основе купридов титана на их износостойкость. Исследованию этого вопроса и посвящена данная работа.

Материалы и методы исследования

Исследование проводили на покрытиях различного химического состава (рис.1), получен-

ных после термообработки биметаллических образцов (М1 + ВТ1-0, МН19 + ВТ1-0 и МН45 + ВТ1-0, изготовленных сваркой взрывом) по режиму контактного плавления (900 °C, 15 мин) [12–15].

При испытании на стойкость к абразивному изнашиванию при 20, 200, 400 и 600 °C использовали разработанную в ВолгГТУ [22] лабораторную установку в которой контртелом является вращающееся кольцо из стали 12Х18Н9Т с абразивными частицами на его поверхности, а неподвижный образец закреплен в токоподводящем держателе. Нагрев контртела осуществлялся с помощью расположенного под ним электрического нагревателя сопротивления, а образца – проходящим током от сварочного источника. Температуру контртела до начала испытания и образца в процессе испытания регистрировали с помощью хромель-копелевых термопар, подключенных к аналого-цифровому преобразователю LA-20USB.

Визуализацию сигнала (термоэдс) с преобразователя в виде термического цикла осуществляли в программе PowerGraph 3.3 Professional. Температуру контртела в процессе испытания измеряли с помощью инфракрасного пирометра С-20.4. На торцах образцов были сформированы площадки, через которые осуществлялась их фиксация и подвод тока от держателя. На передней кромке рабочего участка было сформировано скругление радиусом 0,4 мм, позволяющее абразивным частицам проникать под образец. В качестве абразивной массы использовали порошок электрокорунда белого марки 25А (ГОСТ 28818–90) со средним размером частиц 160 мкм. Перед применением порошок сушили в печи для удаления влаги, повторное использование абразива не допускалось. Путь трения составлял 40 м скорость движения образца относительно контртела 0,12 м/с, давление на образец 1 МПа.

Рис. 1. Микроструктуры, кривые распределения химических элементов и микротвердость покрытий различного химического состава, сформированных на поверхности титана

В качестве критерия износостойкости материалов 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.

Фазовый состав покрытий оценивали при сопоставлении данных, полученных с помощью дифрактометра Bruker D8 Advance и растрового двухлучевого электронного микроскопа системы Versa 3D.

Замеры микротвердости выполняли на микротвердомере ПМТ-3М.

Полученные результаты и их обсуждение

Сопоставление полученных с помощью дифрактометра Bruker D8 Advance и растрового двухлучевого электронного микроскопа систе-

мы Versa 3D экспериментальных данных позволило достоверно идентифицировать в составе бинарного покрытия (рис. 1, а) следующие фазы: твердый раствор титана в меди, TiCu_2 , βTiCu_4 и Ti_3Cu_4 . В покрытии, содержащем ~ 10 % Ni (рис. 1, б), – TiCu , Ti_2Cu , Ti_2Cu_3 , TiNi , TiCuNi , а в покрытии, содержащем ~ 20 % Ni (рис. 1, в), – TiCuNi , TiNi , TiCu , Ti_2Ni и Ti_2Cu .

Результатом таких фазовых изменений является увеличение средних значений твердости покрытия. При этом ее наибольшее значение всегда наблюдается в богатом атомами титана слое, расположенном ближе к поверхности покрытия (рис. 1).

Анализ экспериментальных данных, полученных после испытаний на абразивное изнашивание, показал, что при 20 °С износостойкость бинарных покрытий системы Cu-Ti в 1,8 раза выше в сравнении с титановым сплавом BT1-0 (таблица, рис. 2). Легирование никелем увеличивает эту разницу до 1,9 (10 % Ni) и 2,1 раз (20 % Ni).

Рис. 2. Относительная износостойкость покрытий, полученных после ВТО:
1 – бинарные; 2 – легированные 10 % Ni; 3 – легированные 20 % Ni. Эталон: титан BT1-0

Влияние температуры испытания и содержания Ni в составе покрытия на его износостойкость

Содержание Ni, %	Потеря объема эталона, мм ³	Потеря объема образца с покрытием, мм ³	Потеря объема эталона, мм ³	Относительная износостойкость
0	2,78	1,53	2,78	1,81
	3,06	1,78	3,06	1,73
	3,39	2,40	3,39	1,41
	4,03	3,21	4,03	1,26
10	2,78	1,48	2,78	1,88
	3,06	1,58	3,06	1,95
	3,39	1,97	3,39	1,72
	4,03	3,05	4,03	1,32
20	2,78	1,32	2,78	2,14
	3,06	1,47	3,06	2,10
	3,39	1,95	3,39	1,74
	4,03	2,97	4,03	1,36

Такая же тенденция сохраняется и при испытаниях в диапазоне температур 200 – 600 °C (таблица, рис. 3). При этом наблюдается снижение износостойкости как титана BT1-0, так и сформированных покрытий. Но, тем не менее, наилучшие результаты показывают легированные покрытия, что связано с их более высокой твердостью в сравнении с бинарными. Поскольку стойкость к износу легированных Ni покрытий при увеличении содержания Ni в их составе повышается несопоставимо мало, очевидно, что использование медноникелевых сплавов с высоким содержанием Ni на первом этапе технологического процесса их получения нецелесообразно.

Выводы

1. Легирование зоны взаимодействия при контактном плавлении в системе Cu-Ti никелем

приводит к повышению износостойкости формирующихся на поверхности титана покрытий (в сравнении с бинарными) вследствие появления в их структуре интерметаллидов, богатых никелем и титаном.

2. Использование медноникелевых сплавов с высоким содержанием Ni на первом этапе технологического процесса получения покрытий системы Cu-Ti-Ni нецелесообразно, поскольку их стойкость к износу при увеличении содержания Ni повышается незначительно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование кинетики процесса контактного эвтектического плавления в сваренных взрывом титано-медно-стальных композитах / С. В. Крашенинников, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Н. И. Чистякова // Перспективные материалы. – 2005. – № 3. – С. 75–80.
2. The effect of novel Ti-Cu intermetallic compound coatings on tribological properties of copper / Bateni M.R. [et al.] // Annals. – 2003. – Т. 24. – С. 26.

3. Морозова, Е. А. Лазерное легирование поверхности титана медью / Е. А. Морозова, В. С. Муратов // Успехи современного естествознания. – 2009. – № 11. – С. 71.
4. Radek, N. Experimental investigations of the Cu-Mo and Cu-Ti electro-spark coatings modified by laser beam / N. Radek // Advances in Manufacturing Science and Technology. – 2008. – Т. 32. – №. 2. – С. 53-68.
5. Konieczny, M. Laminar copper-intermetallics composite - generation and properties / M. Konieczny // Kompozyty (Composites). – 2006. – № 4. – p. 52-55.
6. Bratanich, T. I., “Kinetics of destructive hydrogenation of Ti_2Cu and $TiCu$ intermetallics / T. I. Bratanich, V. V. Skorokhod, O. V. Kucheryavii // Powder Metall. Met. Ceram – 2010. – №. 6. – p. 330–338.
7. The effect of novel Ti-Cu intermetallic compound coatings on tribological properties of copper / Bateni M.R. [et al.] // Annals. – 2003. – Т. 24. – С. 26.
8. Диффузионное титанирование как метод повышения износостойкости латуни и бронзы в агрессивных средах / Б. П. Середа [и др.] // [Electronic resource]: http://www.zgia.zp.ua/gazeta/METALURG_26_14.pdf
9. Крашенинников, С. В. Исследование особенностей формирования и свойств интерметаллидных покрытий систем Ti-Cu и Ti-Ni на поверхности стальных деталей: дис. канд. техн. наук : 05.02.01 / Крашенинников С. В. – Волгоград, 2006. – 129 с. РГБ ОД, 61:07-5/59.
10. Радюк, А. Г. Формирование диффузионных слоев на поверхности меди и ее сплавов / А. Г. Радюк, А. Е. Титлянов, А. Е. Украинцев // Цветные металлы. – 2007. – № 5. – С. 95–97.
11. Salehi, M. Structural characterisation of novel Ti-Cu intermetallic coatings / M. Salehi, R. Hosseini // Surface engineering. – 1996. – Т. 12. – №. 3. – С. 221-224.
12. Formation of Ti-Cu-Based Intermetallic Coatings on the Surface of Copper During Contact Melting / Д.А. Евстропов, В.Г. Шморгун, Л.М. Гуревич, [и др.] // Metallurgist. – 2016. – Vol. 59, Issue 9-10 (January 2016). – С. 974–979.
13. 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.
14. Формирование зоны взаимодействия на межслойной границе сваренного взрывом композита ВТ1-0 + МН45 при контактом плавлении / А. Г. Серов, С. А. Кузнецов, А. В. Малых [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (239) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 7–13.
15. Формирование диффузионной зоны при контактом плавлении на межслойной границе сваренного взрывом композита ВТ1-0 + МН19 / А. Г. Серов, В. П. Кулевич, Р. Е. Новиков [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (227) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 7–14.
16. Formation of coatings based on titanium cuprides by explosive welding with subsequent laser treatment / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, В. О. Харламов, А. С. Кайгородов // Metal Science and Heat Treatment. – 2020. – Vol. 62, No. 5-6 (September). – P. 387-392. – DOI: 10.1007/s11041-020-00572-7
17. Серов, А. Г. Structural Formation in the Zone of Interaction under Laser Processing of Bimetal M1 + VT1-0 / А. Г. Серов, О. В. Слаутин, Д. В. Проничев // Solid State Phenomena. Vol. 299 : Materials Engineering and Technologies for Production and Processing V / ed. by A. A. Radionov. – Switzerland : Trans Tech Publications Ltd (Scientific.Net), 2020. – P. 772-777. – URL : <https://www.scientific.net/SSP.299>.
18. Шморгун, В. Г. Structure and properties of intermetallic coatings formed by laser alloying of a titanium surface with copper / В.Г. Шморгун, О.В. Слаутин, А.Г. Серов // Materials Today: Proceedings. Vol. 25, part 3 : III All-Russian Conference (with International Participation) Hot Topics of Solid State Chemistry : From New Ideas to New Materials (Novosibirsk, Russia, October 1-5, 2019) / ed. by T. Shakhshneider [et al.] ; Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk State University. – [Publisher: Elsevier], 2020. – P. 493-496. – URL : <https://www.sciencedirect.com/journal/materials-today-proceedings/vol/25/part/P3>.
19. Формирование диффузионной прослойки при лазерном нагреве композита медь–титан / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, А. Н. Романов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (229) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 11–14.
20. 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.
21. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля : монография / Н. А. Ночовная, О. А. Базылева, Д. Е. Каблов, П. В. Панин ; под общ. ред. академика РАН, профессора Е. Н. Каблова ; Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. – Москва : ВИАМ, 2018. – 303 с.
22. Методика испытаний наплавленных сплавов на стойкость к высокотемпературному абразивному изнашиванию / А. А. Артемьев, А. А. Антонов, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак // Трение и износ. – 2017. – Т. 38, № 3. – С. 247–254.