

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 538.911; 548.4; 620.186; 621.762.3

DOI: 10.17223/00213411/64/6/177

И.А. ДИТЕНБЕРГ^{1,2}, И.В. СМИРНОВ^{1,2}, М.А. КОРЧАГИН³, Ю.П. ПИНЖИН^{1,2},
И.М. ГОНЧАРЕНКО⁴, К.В. ГРИНЯЕВ^{1,2}, А.Д. КОРОТАЕВ^{1,2}, Д.А. ОСИПОВ^{1,2}

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СПЛАВА*

Ключевые слова: многокомпонентная система, тугоплавкие металлы, тлеющий разряд, микротвердость.

Обладая уникальным комплексом физико-механических свойств, многокомпонентные системы на основе тугоплавких металлов рассматриваются в качестве перспективных материалов для применения в экстремальных условиях эксплуатации (высокие температуры, большие давления, агрессивные среды и т.д.) [1–7]. Хорошо известно, что тугоплавкие металлы характеризуются высокой химической активностью к примесям внедрения (С, N, O) [8]. В этой связи разработка вопросов взаимодействия многокомпонентных сплавов с этими примесями является актуальной задачей, которая помимо фундаментального интереса имеет непосредственное отношение к развитию новых технологий получения и обработки таких материалов.

В настоящей работе проведено изучение влияния продолжительности обработки в тлеющем разряде на микротвердость многокомпонентного сплава на основе тугоплавких металлов.

Использован сплав неэквивалентного состава (5.3W–5.4Ta–10.1Mo–10.5Nb–19.1V–18.7Cr–10.7Zr–20.3Ti, ат. %), все компоненты взяты в равных весовых долях. Заготовка сплава получена путем энергонапряженной механической активации смеси порошков с последующей консолидацией методом искрового плазменного спекания [9, 10]. Для обработки в тлеющем разряде применялись образцы пластинчатой формы 6×8 мм толщиной 1.5 мм. Поверхность перед обработкой подвергалась механической полировке на алмазной пасте с последовательным уменьшением размера абразива. Обработка в тлеющем разряде проведена при рабочем давлении чистого азота 80–90 Па. Частотно-импульсное (частота 20 кГц, коэффициент заполнения 80%) напряжение разряда – 830 В, ток разряда – 15.5 А. Продолжительность изотермической выдержки без учета времени нагрева до рабочей температуры (550–560 °С) и охлаждения составила 3 и 6 ч.

Исследование микроструктуры и качественный анализ химического состава (энергодисперсионный (EDX)) образцов после обработки проведены с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 SBH (30 кВ). Микротвердость (H_V) определяли методом Виккерса на приборе «Neophot 21» и на твердомере ПМТ-3. Отпечатки получали с выдержкой 15 с при нагрузках от 0.5 до 2 Н.

Особенности структурно-фазового состояния многокомпонентной смеси после консолидации методом искрового плазменного спекания подробно представлены в работе [10]. На рис. 1, а приведено полученное в Z-контрасте электронно-микроскопическое изображение микроструктуры сплава после обработки в тлеющем разряде. Каких-либо изменений в зеренной структуре сплава не обнаружено. В то же время в результате энергодисперсионного анализа выявлено качественное изменение химического состава. В частности на рис. 1, б продемонстрировано существенное увеличение интенсивности пиков, характеризующих наличие легких элементов внедрения (С, N, O), после обработки в тлеющем разряде по сравнению с исходным состоянием.

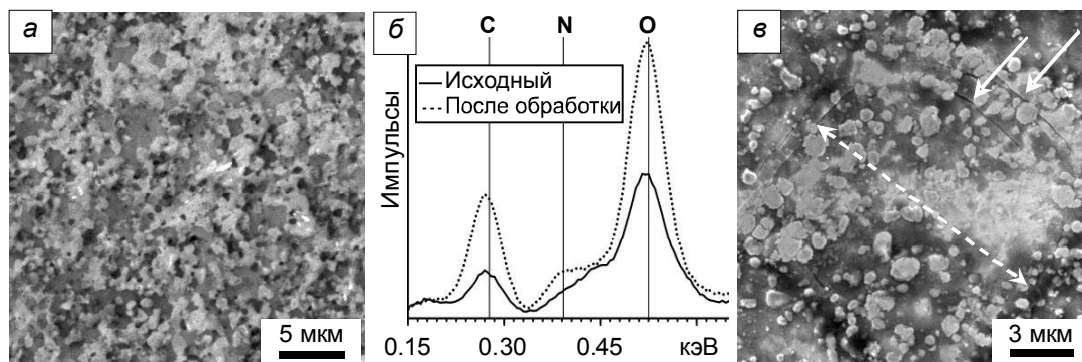


Рис. 1. Поверхность многокомпонентной системы после обработки в тлеющем разряде: изображение в Z-контрасте (а), энергодисперсионные спектры (б), изображение отпечатка при нагрузке индентора 2 Н (в). СЭМ

* Работа выполнена в рамках госзадания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0008.

Установлено, что проведенная обработка приводит к увеличению микротвердости многокомпонентного сплава. В соответствии с [9, 10], H_V после искрового плазменного спекания составляет (8.95 ± 0.42) ГПа. В таблице приведены данные о микротвердости сплава в зависимости от продолжительности обработки в тлеющем разряде и прилагаемой нагрузки, также указаны соответствующие значения глубины проникновения индентора (L). Наблюдаемый разброс в значениях микротвердости, по нашему мнению, связан с неоднородностью структурно-фазового состояния. Увеличение продолжительности обработки сопровождается как повышением значений микротвердости, так и ростом толщины приповерхностного слоя. На фоне увеличения H_V обнаружено растрескивание материала при высоких нагрузках. В частности, после 6 ч обработки и индентирования при нагрузке 2 Н на внутренних гранях отпечатка, параллельно внешней кромке, формируются протяженные трещины (белые стрелки на рис. 1, в), что свидетельствует об охрупчивании сплава. Кроме того, локализация трещин вблизи поверхности косвенно указывает на то, что модификация происходит в тонком, по сравнению с размерами отпечатка (с учетом геометрии пирамидки Виккерса), приповерхностном слое.

Микротвердость H_V и глубина проникновения индентора L в приповерхностном слое сплава W-Ta-Mo-Nb-V-Cr-Zr-Ti в зависимости от режима обработки и прилагаемой нагрузки

Режим	P , Н	0.5	0.75	1	1.5	2
I (3 ч)	H_V , ГПа	16.75 ± 2.42	12.64 ± 1.48	11.76 ± 1.52	10.28 ± 2.54	10.35 ± 3.32
	L , мкм	1.14 ± 0.08	1.56 ± 0.09	1.87 ± 0.11	2.49 ± 0.34	2.91 ± 0.49
II (6 ч)	H_V , ГПа	18.81 ± 2.84	21.49 ± 1.88	16.49 ± 0.90	12.11 ± 1.11	12.85 ± 2.69
	L , мкм	1.05 ± 0.09	1.20 ± 0.05	1.57 ± 0.04	2.25 ± 0.10	2.55 ± 0.27

Необходимо заметить, что представленные значения H_V отражают микротвердость системы «модифицированный слой – сплав». В отличие от пленок и покрытий, четкой границы между этими разными структурными состояниями не существует. Плавное изменение микротвердости свидетельствует о градиентном характере изменения структурно-фазового состояния модифицированного слоя. Таким образом, в представленных условиях обработки результатом взаимодействия многокомпонентного сплава с элементами газовой среды является модификация тонкого приповерхностного слоя. Основные изменения, по нашему мнению, связаны с трансформацией гетерофазного состояния, определяемого особенностями твердых растворов и спецификой простых (карбиды, оксиды, нитриды) и сложных (оксикарбонитриды) соединений на основе (С, N, O).

Структурные исследования проведены с использованием оборудования ТРЦКП ТГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Xian X., Zhong Z., Zhang B. et al. // Mater. Design. – 2017. – V. 121. – P. 229–236.
- Senkov O.N., Wilks G.B., Miracle D.B., et al. // Intermetallics. – 2010. – V. 18. – No. 9. – P. 1758–1765.
- Long Y., Liang X., Su K., et al. // J. Alloys Compounds. – 2019. – V. 780. – P. 607–617.
- Дитенберг И.А., Смирнов И.В., Осипов Д.А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2020. – Т. 63. – № 6. – С. 172–173.
- Kang B., Lee J., Ryu H.J., and Hong S.H. // Mater. Sci. Eng. A. – 2018. – V. 712. – P. 616–624.
- Yao H.W., Qiao J.W., Hawk J.A., et al. // J. Alloys Compounds. – 2017. – V. 696. – P. 1139–1150.
- Senkov O.N., Senkova S.V., Woodward C., and Miracle D.B. // Acta Mater. – 2013. – V. 61. – No. 5. – P. 1545–1557.
- Fromm E. and Gebhardt E. Gases and Carbon in Metals. – Springer Verlag, 1976. – 771 p.
- Дитенберг И.А., Корчагин М.А. Смирнов И.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2019. – Т. 62. – № 9. – С. 185–186.
- Ditenberg I.A., Smirnov I.V., Korchagin M.A., et al. // Entropy. – 2020. – V. 22. – No. 2. – P. 143.

Поступило в редакцию 25.05.2021.

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

³ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

⁴ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Дитенберг Иван Александрович, д.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой НИ ТГУ, введущ. науч. сотр., зав. лабораторией ИФПМ СО РАН, e-mail: ditenberg_i@mail.ru;

Смирнов Иван Владимирович, мл. науч. сотр. ИФПМ СО РАН, ассистент НИ ТГУ, e-mail: smirnov_iv@bk.ru;

Корчагин Михаил Алексеевич, д.т.н., введущ. науч. сотр. ИХТТМ СО РАН, e-mail: korchag@solid.nsc.ru;

Пинжин Юрий Павлович, к.ф.-м.н., доцент, введущ. науч. сотр. ИФПМ СО РАН, доцент НИ ТГУ, e-mail: pinzhin@phys.tsu.ru;

Гончаренко Игорь Михайлович, к.т.н., ст. науч. сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: ugor2012@sibmail.com;

Гриняев Константин Вадимович, мл. науч. сотр. ИФПМ СО РАН, инженер НИ ТГУ, e-mail: kvgrinyayev@inbox.ru;

Коротаев Александр Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор, введущ. науч. сотр. ИФПМ СО РАН, профессор НИ ТГУ, e-mail: korotaev@phys.tsu.ru;

Осипов Денис Андреевич, инженер ИФПМ СО РАН, аспирант НИ ТГУ, e-mail: osipov_ff_tsu@mail.ru.