

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Al-Cr-Fe-Co-Ni, МОДИФИЦИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ

М.О. Ефимов<sup>1)</sup>, В.Е. Громов<sup>1)</sup>, Ю.Ф. Иванов<sup>2)</sup>, Ю.А. Шлярова<sup>1)</sup>, И.А. Панченко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Сибирский государственный индустриальный университет,  
ул. Кирова 42, Новокузнецк 654007, Россия, moefimov@mail.ru, gromov@physics.sibsiu.ru,  
rubannikova96@mail.ru, i.r.i.ss@yandex.ru

<sup>2)</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,  
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия, yufi55@mail.ru

Используя технологию проволочно-дугового аддитивного производства, был изготовлен высокоэнтропийный сплав (ВЭС) неэквивалентного состава Al, Cr, Fe, Co, Ni. Методами современного физического материаловедения выполнен анализ механических и трибологических свойств поверхностного слоя ВЭС, сформированного в результате комплексного модифицирования, сочетающего напыление пленки (B+Cr) и облучение импульсным электронным пучком в среде аргона. Выявлен режим облучения (плотность энергии пучка электронов  $E_S = 20$  Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса – 200 мкс, число импульсов – 3 имп., частота – 0.3 с<sup>-1</sup>), позволяющий повысить микротвердость (почти в 2 раза) и износостойкость (более чем в 5 раз), снизить коэффициент трения в 1.3 раза. Показано, что увеличение прочностных и трибологических свойств ВЭС обусловлено существенным (в 4.5 раза) снижением среднего размера зерна.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийный сплав; аддитивная технология; система «пленка/подложка»; электронно-ионно-плазменная обработка; элементный и фазовый состав; дефектная структура.

## ANALYSIS OF CHANGES IN THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER OF THE AL-CR-Fe-CO-NI HIGH-ENTROPY ALLOY MODIFIED BY ELECTRON-ION-PLASMA TREATMENT

M.O. Efimov<sup>1)</sup>, V.E. Gromov<sup>1)</sup>, Yu.F. Ivanov<sup>2)</sup>, Yu.A. Shlyarova<sup>1)</sup>, I.A. Panchenko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Siberian State Industrial University, 42 Kirova Str., 654007 Novokuznetsk, Russia,  
moefimov@mail.ru, gromov@physics.sibsiu.ru, rubanniko-va96@mail.ru, i.r.i.ss@yandex.ru

<sup>2)</sup>Institute of High-Current Electronics SB RAS,  
2/3 Akademicheskii Ave., 634055 Tomsk, Russia, yufi55@mail.ru

Using the technology of wire-arc additive manufacturing, a high-entropy alloy (HEA) of non-equiatomic composition Al, Cr, Fe, Co, Ni was manufactured. The analysis of the elemental and phase composition, defective substructure, mechanical and tribological properties of the HEA surface layer, formed as a result of complex modification, combining the deposition of a film (B + Cr) and irradiation with a pulsed electron beam in an argon medium, was carried out using the methods of modern physical materials science. The irradiation regime was revealed (energy density of the electron beam  $E_S = 20$  J/cm<sup>2</sup>, pulse duration - 200  $\mu$ s, number of pulses - 3 pulses, frequency - 0.3 s<sup>-1</sup>), which makes it possible to increase the microhardness (almost 2 times) and wear resistance (more than 5 times), reduce the coefficient of friction by 1.3 times. It is shown that an increase in the strength and tribological properties of HEA is due to a significant (4.5 times) decrease in the average grain size, the formation of particles of chromium and aluminum oxyborides, and the incorporation of boron atoms into the crystal lattice of HEA.

**Keywords:** high entropy alloy; additive technology; film/substrate system; electron-ion-plasma processing; elemental and phase composition; defect structure.

### Введение

В последние два десятилетия внимание исследователей в области физического

материаловедения привлечено к исследованию структуры, свойств, методов получения и стабильности так называемых вы-

сокоэнтропийных сплавов (ВЭС) [1, 2], содержащих не менее 5 основных элементов. Такой интерес обусловлен уникальными физико-механическими свойствами ВЭС (коррозионной и износостойкостью, жаро- и криопрочностью, особыми магнитными и электрическими свойствами и т.д.), что делает их перспективными для различных областей использования [3-5].

Присутствие нескольких составляющих элементов в составе ВЭС позволяет получать различные покрытия на их основе для использования в особых условиях. Оксидные, нитридные, боридные покрытия обладают превосходными механическими характеристиками, что значительно расширяет диапазон их применения [6, 7].

Целью работы является анализ механических и трибологических свойств поверхностного слоя ВЭС, сформированного в результате комплексного модифицирования, сочетающего напыление пленки (В+Cr) и облучение импульсным электронным пучком.

#### Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использован высокоэнтропийный сплав элементного состава Al, Cr, Fe, Co, Ni, полученный с помощью технологии проволоочно-дугового аддитивного производства. Обработка поверхностного слоя ВЭС проводилась следующим образом: (1) формировали систему «пленка/подложка» (напыляли пленку бора толщиной 0.5 мкм, поверх пленки бора напыляли пленку хрома толщиной 0.5 мкм), (2) облучали систему «пленка (В)+пленка (Cr) / (ВЭС) подложка» импульсным электронным пучком. Облучение системы «пленка/подложка» интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО» при следующих параметрах процесса: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов (20-40) Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса 200 мкс, количество импульсов 3, частота

следования импульсов 0,3 с<sup>-1</sup>, давление рабочего газа (аргон) 0,02 Па.

Твердость материала определяли по схеме Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0.5 Н. Исследование трибологических (коэффициент трения и параметр износа) характеристик материала осуществляли на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция).

#### Результаты и их обсуждение

Облучение системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком приводит к существенному изменению механических и трибологических свойств ВЭС. Во-первых, существенно увеличивается микротвердость, достигая максимального значения после облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов  $E_s = 20$  Дж/см<sup>2</sup> (рис. 1а).

Во-вторых, повышается износостойкость образцов и снижается коэффициент трения, достигая наилучших значений после облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 1б, 1в)

Очевидно, что изменение механических и трибологических свойств сплава обусловлено преобразованием структуры поверхностного слоя образцов. При облучении системы «пленка/подложка» пучком электронов с плотностью энергии 20 Дж/см<sup>2</sup> поверхность образца фрагментируется сеткой микротрещин. Размер фрагментов изменяется в пределах от 40 мкм до 200 мкм при среднем размере 104 мкм. В объеме фрагментов выявляется зеренная структура. Средний размер зерен 2.7 мкм, что в 4.5 раза меньше среднего размера зерен ВЭС в исходном состоянии.

С увеличением плотности энергии пучка электронов средний размер зерен поверхностного слоя ВЭС возрастает и при  $E_s = 40$  Дж/см<sup>2</sup> составляет 19 мкм.

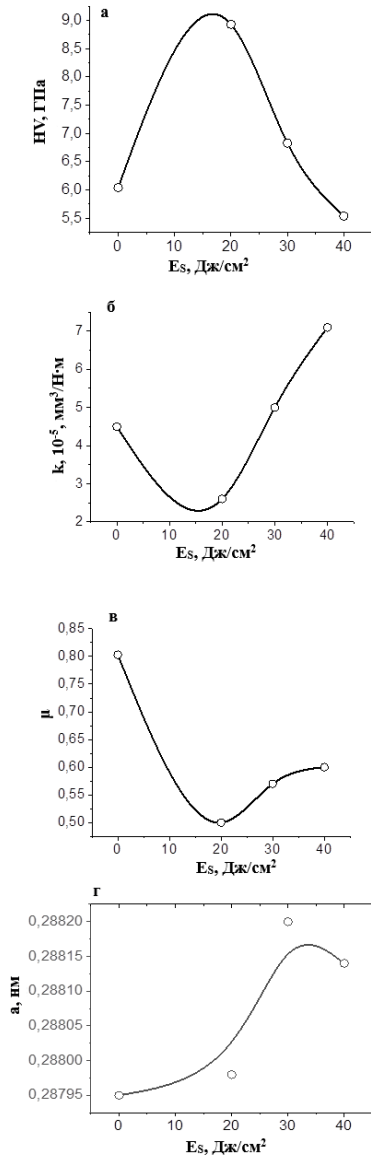


Рис. 1. Зависимость микротвердости (а), параметра износа (б), коэффициента трения (в) и параметра кристаллической решетки (г) поверхностного слоя системы «пленка/подложка» от плотности энергии пучка электронов. Микротвердость ВЭС в исходном состоянии 4.7 ГПа. Параметр износа системы «пленка/подложка» перед облучением  $14 \cdot 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>/Н\*м, коэффициент трения 0.65

Очевидно, что многократное уменьшение среднего размера зерен поверхностного слоя ВЭС при  $E_s = 20$  Дж/см<sup>2</sup> является одной из причин повышения прочностных свойств сплава (эффект Холла-Петча).

## Заключение

Используя технологию проволочно-дугового аддитивного производства, изготовлены образцы высокоэнтропийного сплава элементного состава Al, Cr, Fe, Co, Ni. Осуществлена комплексная обработка поверхностного слоя образцов ВЭС, сочетающая формирование системы «пленка (Cr+V)/(ВЭС) подложка» и последующее облучение импульсным электронным пучком при различных (20-40 Дж/см<sup>2</sup>) значениях плотности энергии пучка электронов. Выявлен режим облучения (20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.,  $0.3 \text{ с}^{-1}$ ), позволяющий существенно повысить микротвердость (почти в 2 раза) и износостойкость (более чем в 5 раз), снизить коэффициент трения в 1.3 раза.

## Библиографические ссылки

1. George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia* 2020; 188: 435-474.
2. Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение. *Изв. вузов. Черная металлургия* 2021; 64(4): 249-258.
3. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Mater.* 2017; 122: 448-511.
4. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Sci China Mater.* 2018; 61(1): 2-22.
5. Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-Entropy Alloys: A Critical Review. *Mater. Res. Lett.* 2014; 2:3(3): 107-123.
6. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов. *Физика металлов и металловедение* 2020; 121(8): 807-841.
7. Погребняк А.Д., Багдасарян А.А., Якущенко И.В., Береснев В.М. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе. *Успехи химии* 2014; 83(11): 1027-1061.