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

М.О. Ефимов[1)], В.Е. Громов[1)], Ю.Ф. Иванов[2)], Ю.А. Шлярова[1)], И.А. Панченко[1)]
[1)]*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
[2)]*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) неэквиатомного 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^2, длительность импульса – 200 мкс, число импульсов – 3 имп., частота – 0.3 с$^{-1}$), 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[1)], V.E. Gromov[1)], Yu.F. Ivanov[2)], Yu.A. Shlyarova[1)], I.A. Panchenko[1)]
[1)]*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
[2)]*Institute of High-Current Electronics SB RAS,*
2/3 Akademicheskiy 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 ES = 20 J/cm^2, pulse duration - 200 μs, number of pulses - 3 pulses, frequency - 0.3 s^{-1}), 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 (B+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 проволочно-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 (B)+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^2, длительность импульса 200 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 с$^{-1}$, 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 Es = 20 Дж/см^2 (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^2 (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^2 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^2 составляет 19 мкм.

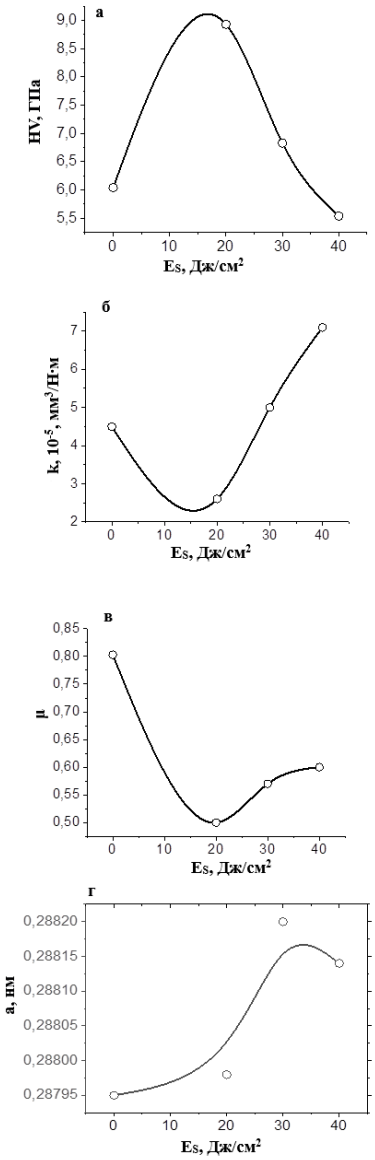

Рис. 1. Зависимость микротвердости (а), параметра износа (б), коэффициентра трения (в) и параметра кристаллической решетки (г) поверхностного слоя системы «пленка/подложка» от плотности энергии пучка электронов. Микротвердость ВЭС в исходном состоянии 4.7 ГПа. Параметр износа системы «пленка/подложка» перед облучением $14 \cdot 0^{-5}$ мм^3/Н*м, коэффициент трения 0.65

Очевидно, что многократное уменьшение среднего размера зерен поверхностного слоя ВЭС при Es = 20 Дж/см^2 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+B)/(ВЭС) подложка» и последующее облучение импульсным электронным пучком при различных (20-40 Дж/см^2) значениях плотности энергии пучка электронов. Выявлен режим облучения (20 Дж/см^2, 200 мкс, 3 имп., 0.3 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., Tasan 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.