

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ, ПОДВЕРГНУТОГО КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ

^{1,2}Ю.Ф. Иванов, ¹А.Д. Тересов, ¹Е.А. Петрикова, ¹О.В. Крысина, ²А.Р. Шамиева, ¹В.В. Денисов, ²О.С. Толкачев, ¹В.В. Шугуров, ¹Н.Н. Коваль

¹Институт сильноточной электроники СО РАН

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
г. Томск, Россия

Целью работы являлось обнаружение и анализ закономерностей эволюции структуры и трибологических свойств образцов технически чистого алюминия, подвергнутых комбинированной электронно-ионно-плазменной обработке. Комбинированная обработка поверхности технически чистого алюминия заключалась в азотировании (550 °С, (1–7) часов) в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком давлении (1 Па), последующем напылении покрытия нитрида циркония толщиной 0,5 мкм и облучении системы «покрытие / подложка» интенсивным импульсным электронным пучком. Напыление твердого покрытия осуществляли на вакуумной ионно-плазменной установке, оснащенной электродуговыми испарителями (источники металлической плазмы на основе дугового разряда с катодным пятном) и плазменными источниками на основе несамостоятельного дугового разряда с накаливаемыми катодами. В качестве материала испаряемого катода использовали технически чистый цирконий. Облучение системы «покрытие / подложка» осуществляли на установке, оснащенной электронным источником на основе импульсного дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы и открытой границей анодной плазмы. Облучение системы «покрытие / подложка» осуществляли при параметрах пучка электронов (10 Дж/см²; 150 мкс; 10 имп.; 0,3 с⁻¹), позволяющих проводить плавление тонкого поверхностного слоя алюминия. Выявлен режим комбинированной обработки, приводящий к многократному повышению износостойкости и снижению коэффициента трения технически чистого алюминия. Показано, что основной причиной повышения трибологических свойств материала является формирование многослойной многофазной нанокристаллической структуры, представленной оксинитридным покрытием на основе циркония, сформированном на слое нитрида алюминия, образованном в результате предварительного азотирования и модифицированном в результате облучения интенсивным импульсным электронным пучком.

Ключевые слова: азотирование, электронно-ионно-плазменная обработка, алюминий марки А7, износостойкость, структура

STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINUM SUBJECTED TO COMBINED ELECTRON-ION-PLASMA TREATMENT

^{1,2}Yu.F. Ivanov, ¹A.D. Teresov, ¹E.A. Petrikova, ¹O.V. Krysinina,
²A.R. Shamieva, ¹V.V. Denisov, ²O.S. Tolkachev, ¹V.V. Shugurov, ¹N.N. Koval

¹Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The purpose of work was detection and the analysis of regularities of evolution of structure and tribological properties of the samples of commercial-grade aluminum subjected to the combined electron-ion-plasma treatment. The combined surfacing of commercial-grade aluminum consisted in nitriding (550 °C, (1–7) hours) in plasma of a non-self-sustained glow discharge with the hollow cathode at low pressure (1 Pa), the subsequent deposition of a coating of zirconium nitride 0.5 microns thick and irradiation of the «coating / substrate» system an intensive pulsed electron beam. Deposition of a nitride coating was carried out on the vacuum ion-plasma installation equipped with arc evaporators (sources of metal plasma on the basis of an arc discharge with a cathode spot) and plasma sources on the basis of a non-self-sustained arc discharge with thermionic cathodes. As material of the evaporated cathode, the commercial-grade zirconium was used. Irradiation of the «coating / substrate» system was carried out on the installation equipped with an electron source on the basis of a pulsed arc discharge of low pressure with grid stabilization of border of cathode plasma and open border of anode plasma. Irradiation of the «coating / substrate» system was carried out at electron beam parameters (10 J/cm²; 150 μs; 10 pls.; 0.3 s⁻¹), allowing to carry out melting of the thin surface layer of aluminum. The mode of the combined treatment leading to multiple increase in wear resistance and decrease in a friction coefficient of commercial-grade aluminum is revealed. It is shown that formation of the multilayer multiphase nanocrystalline structure presented by a nitride coating on the basis of zirconium, created on the aluminum nitride layer formed as a result of preliminary nitriding and modified in result of irradiation by an intensive pulsed electron beam is the main reason for increase in tribological properties of material.

Keywords: nitriding, electron-ion-plasma treatment, A7 grade aluminum, wear resistance, structure

E-mail: yufi55@mail.ru

1. Введение

Алюминий и сплавы на его основе широко используются в промышленности благодаря достаточно большой удельной прочности, удовлетворительной коррозионной стойкости и хорошей обрабатываемости механическими методами. К недостаткам алюминия следует отнести малую твердость и невысокую износостойкость [1–3]. Для улучшения трибологических характеристик материала часто напыляют твердые износостойкие покрытия [4–7]. Напыление твердого покрытия на сравнительно мягкую подложку часто приводит к преждевременному разрушению либо отслаиванию покрытия в процессе механических и тепловых нагрузок. Решением данной проблемы является предварительная упрочняющая обработка поверхности изделия или детали концентрированными потоками энергии, насыщение поверхности атомами металлов и газов и т.д. [8–15].

Целью настоящей работы являлось обнаружение и анализ закономерностей эволюции структуры и трибологических свойств образцов технически чистого алюминия, подвергнутых комбинированной электронно-ионно-плазменной обработке.

2. Материал и методики исследования

В качестве материала исследования был использован технически чистый алюминий марки А7 (Al – 99,7 %; Fe – до 0,16 %; Si – до 0,16 %; Ti – до 0,02 %; Cu – до 0,01 %; Zn – до 0,01 %). Напыление нитридного покрытия состава ZrN (толщина покрытия 0,5 мкм) осуществляли на вакуумной ионно-плазменной установке «КВИНТА» [16]. Установка оснащена пятью плазмодогенераторами – тремя электродуговыми испарителями (источники металлической плазмы на основе дугового разряда с катодным пятном) и двумя плазменными источниками на основе несамостоятельного дугового разряда с накаливаемыми катодами. В качестве материала испаряемого катода использовался технически чистый цирконий. Облучение системы «покрытие (ZrN) / (А7) подложка» осуществляли на установке «СОЛО» [17]. Установка оснащена электронным источником на основе импульсного дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы и открытой границей анодной плазмы. Это позволяет генерировать электронный пучок с током до 300 А, энергией электронов до 25 кэВ, длительностью импульса 20–200 мкс, плотностью энергии в импульсе до 80 Дж/см², частотой следования импульсов до 15 с⁻¹. По результатам моделирования поля температур выбрали следующий режим облучения системы «покрытие (ZrN) / (А7) подложка»: плотность энергии пучка электронов $E_s = 10$ Дж/см²; длительность импульса воздействия $\tau = 150$ мкс; количество импульсов $N = 10$ имп.; частота следования импульсов $f = 0,3$ с⁻¹ [17]. Облучение в данном режиме позволяет плавить тонкий поверхностный слой алюминия. Перед напылением покрытия образцы алюминия подвергали азотированию в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком ≈ 1 Па давлении на экспериментальной установке, схема и подробное описание которой приведено в [18]. Материалом полого катода являлась нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Параметры азотирования были выбраны по результатам предварительно выполненных исследований [15]. А именно, температура азотирования – 550 °С, время азотирования – 1–7 часов, рабочее давление азота – 1 Па; напряжение горения тлеющего разряда – 200 В; ток тлеющего разряда – 50 А; напряжение электрического смещения образцов – –200 В; коэффициент заполнения импульса – 100 %.

Структуру образцов исследовали методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа рентгеновских лучей (растровый электронный микроскоп Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV); фазовый и элементный состав, морфологию фаз изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-2100F, JEOL). Трибологические испытания проводили на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция) при следующих параметрах: шарик из стали ШХ15 диаметром 6 мм, радиус трека – 2 мм, нагрузка на индентор – 1 Н, дистанция – (5–80) м. Микротвердость образцов определяли на микротвердомере ПМТ-3, нагрузка на индентор 0,1 Н.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Структура и свойства технически чистого алюминия, подвергнутого азотированию в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком давлении

Методами сканирующей электронной микроскопии установлено, что азотирование алюминия в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком (≈ 1 Па) давлении сопровождается формированием на поверхности образцов структуры островкового типа, размер кристаллитов которой 200–250 нм (рис. 1).

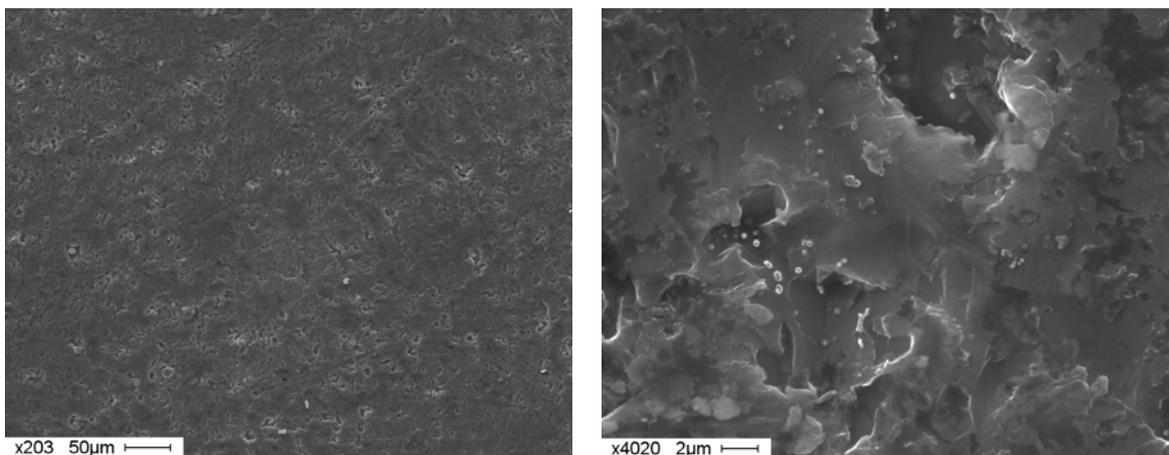


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поверхности образцов технического чистого алюминия марки А7 после азотирования в течение 7 ч. Сканирующая электронная микроскопия

Морфологию и фазовый состав поверхностного слоя образцов, подвергнутых азотированию, исследовали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. На рис. 2 приведено электронно-микроскопическое изображение структуры островков.

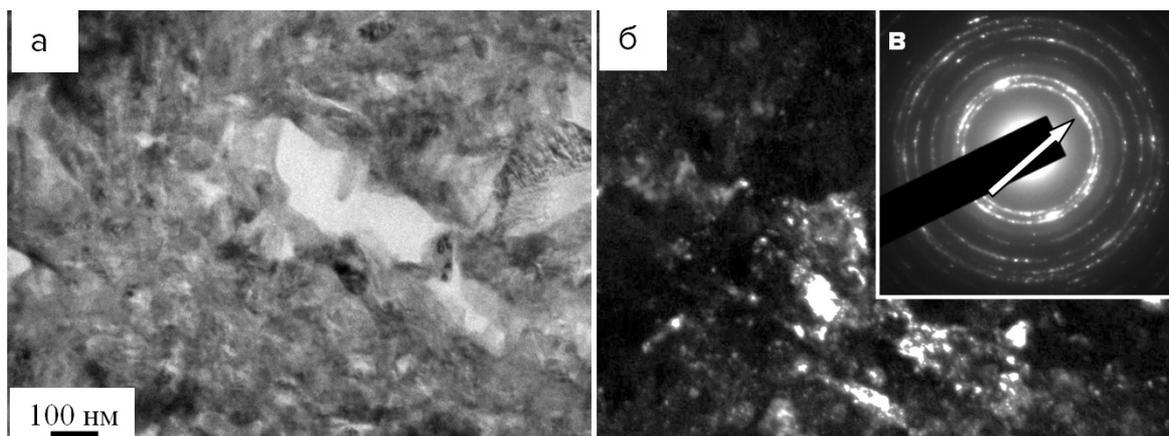


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры островков, формирующихся на поверхности образца алюминия при азотировании (550 °С, 5 ч): а – светлое поле; б – темное поле, полученное в рефлексе [100] AlN; в – микроэлектроннограмма к (б); на (в) стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле

Установлено, что островки имеют нанокристаллическую структуру с размером кристаллитов 5–15 нм (рис. 2, б). Микроэлектроннограммы, полученные с островков, являются кольцевыми, что также указывает на нанокристаллическое строение материала. Индексирование микроэлектроннограммы (рис. 2, в) показало, что дифракционные кольца сформированы рефлексами нитрида алюминия с гексагональной кристаллической решеткой ($a = 0,3113$ нм, $c = 0,4981$ нм).

Структура поверхностного слоя образца алюминия, прилегающего к островковой структуре, представлена на рис. 3.

Поверхностный слой имеет столбчатую структуру (рис. 3, а). Поперечные размеры столбиков изменяются в пределах от 70 нм до 130 нм. Столбики являются нанокристаллическими образованиями, размер кристаллитов (5–10) нм (рис. 3, б, г). Анализ микроэлектроннограммы (рис. 3, в) показывает, что данный слой сформирован

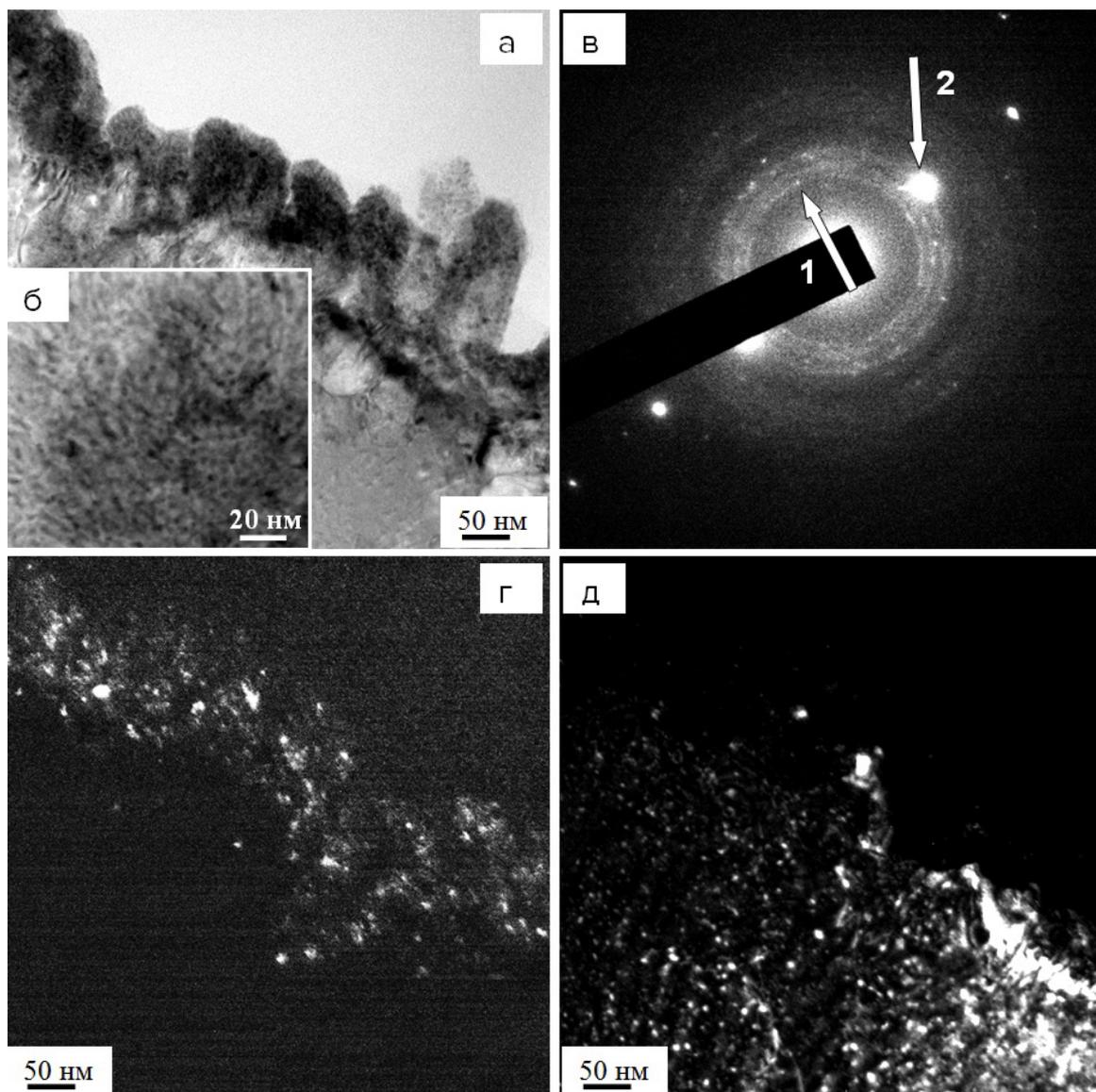


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя образца алюминия после азотирования (550 °С, 5 ч): *а, б* – светлые поля; *в* – микроэлектроннограмма к (*а*); *г, д* – темные поля, полученные в рефлексах [100] AlN (*г*) и [200] AlN + [200] Al (*д*); на (*в*) обозначено 1 – [100] AlN; 2 – [200] AlN + [200] Al. Просвечивающая электронная дифракционная микроскопия.

рован преимущественно нитридом алюминия с гексагональной кристаллической решеткой ($a = 0,3113$ нм, $c = 0,4981$ нм). Подповерхностный слой сформирован поликристаллическим алюминием, в объеме зерен которого присутствуют частицы нитрида алюминия с гранецентрированной кубической кристаллической решеткой (пространственная группа $Fm\bar{3}m$; $a = 0,412$ нм). Размеры частиц нитрида алюминия 2–5 нм (рис. 3, *д*). Толщина подповерхностного слоя алюминия, упрочненного частицами нитрида алюминия, достигает 10–15 мкм. Нижележащий слой (слой термического влияния) имеет высокоразвитую дислокационную субструктуру, представленную малоугловыми границами, делящими объем зерен на полосы. В объеме полос наблюдается структура дислокационного хаоса. Частицы нитридной фазы в данном слое не выявляются.

Путем измерения микротвердости выявлено формирование поверхностного слоя, твердость которого изменяется немонотонным образом, достигая максимального значения при азотировании в течение 3 ч, равного 2040 МПа, что в $\approx 7,7$ раза превышает микротвердость исходного алюминия. Параметр износа (величина, обратная износостойкости) после данной обработки в $\approx 4,7$ раза меньше параметра износа исходного алюминия. Коэффициент трения модифицированного слоя в $\approx 1,2$ раза меньше коэффициента трения исходного алюминия.

Таким образом, азотирование образцов технически чистого алюминия марки А7 в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком давлении ≈ 1 Па привело к формированию многофазной многослойной нанокристаллической структуры, поверхностный слой которой образован наноразмерными частицами нитрида алюминия с гексагональной кристаллической решеткой. В приповерхностном слое в объеме зерен алюминия располагаются наноразмерные частицы нитрида алюминия с гранецентрированной кубической кристаллической решеткой. Показано, что после азотирования микротвердость алюминия в $\approx 7,7$ раза превышает микротвердость исходных образцов; параметр износа (величина, обратная износостойкости) в $\approx 4,7$ раза, а коэффициент трения в $\approx 1,2$ раза меньше соответствующих характеристик исходного алюминия марки А7.

3.2. Структура и свойства технически чистого алюминия, подвергнутого комбинированной обработке

На установке «КВИНТА» на модифицированной в результате предварительного азотирования поверхности образцов технически чистого алюминия марки А7 сформировали твердое нитридное покрытие на основе циркония толщиной 0,5 мкм. Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии установлено, что покрытие имеет столбчатое строение, размер кристаллитов, формирующих столбики, изменяется в пределах от 4 нм до 18 нм. Методами микрорентгеноспектрального анализа показано, что в покрытии присутствуют атомы циркония, кислорода и азота, т.е. следует говорить о формировании на поверхности алюминия оксинитридного покрытия на основе циркония. С целью увеличения адгезионной прочности системы «покрытие (ZrON) / (А7) подложка» проведено вплавление покрытия в подложку путем облучения интенсивным импульсным электронным пучком. Выполнены трибологические испытания и установлено, что параметр износа достигает минимальных значений при времени азотирования подложки, равном 7 ч, и меньше параметра износа исходного алюминия более чем в 90 раз; коэффициент трения меньше коэффициента трения исходного алюминия в $\approx 3,5$ раза. Вплавление покрытия в поверхность образцов алюминия, не подвергавшихся азотированию, приводит к снижению коэффициента износа в $\approx 1,4$ раза, а коэффициента трения в $\approx 2,7$ раза относительно исходного состояния.

Выбрав в качестве объекта дальнейших исследований образец, показавший наилучшую износостойкость, провели анализ его дефектной субструктуры, элементного и фазового состава методами просвечивающей электронной микроскопии. Установлено, что азотирование алюминия, напыление покрытия и последующее облучение системы «покрытие / подложка» электронным пучком сопровождается формированием многослойной структуры (рис. 4). Выделяются покрытие на основе циркония, переходный слой нитрида алюминия, сформировавшийся на стадии азотирования и дополнительного облучения электронным пучком при комбинированной обработке, и слой термического влияния, переходящий в объем образца. Покрытие имеет столбчатое строение (рис. 4, б). Размеры кристаллитов, формирующих столбики, практически не отличаются от размеров кристаллитов, формирующих покрытие до облучения электронным пучком. Переходный слой (рис. 4, в) также имеет столбчатое нанострук-

турное строение. Прилегающий к нитриднему слою объем алюминия имеет субзеренную структуру. В объеме субзерен наблюдается дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций или дислокаций, формирующих нерегулярные сетки.

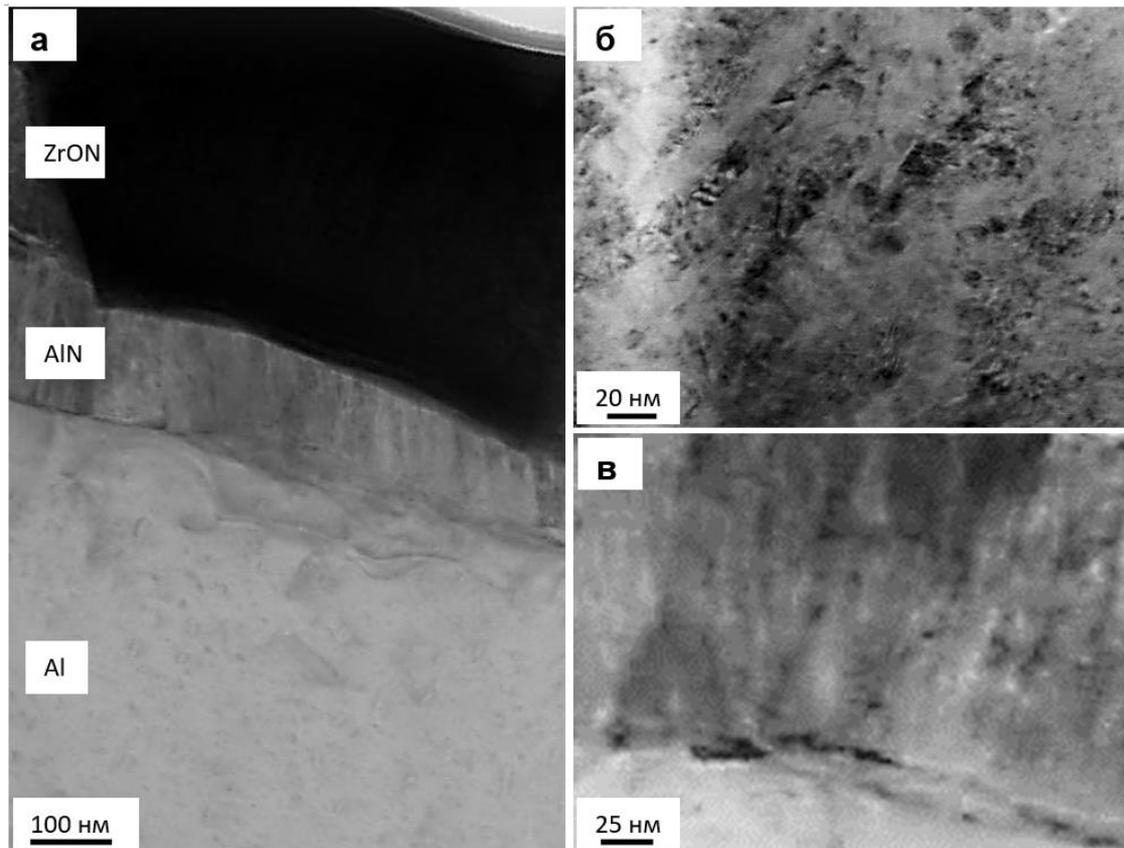


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя образца алюминия, подвергнутого комбинированной обработке

Таким образом, выполненные исследования фазового состава и дефектной субструктуры модифицированных образцов позволяют высказать предположение, что основной причиной повышения трибологических свойств технически чистого алюминия марки А7 является формирование многослойной многофазной нанокристаллической структуры, представленной твердым оксинитридным покрытием на основе циркония, сформированном на слое нитрида алюминия, образованном в результате предварительного азотирования и модифицированного, на заключительном этапе комбинированной обработки, облучением интенсивным импульсным электронным пучком.

Заключение

Установлено, что азотирование образцов технически чистого алюминия марки А7 в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком давлении (≈ 1 Па) приводит к формированию многофазной многослойной нанокристаллической структуры. Показано, что поверхностный слой азотированных образцов имеет столбчатую (островковую) структуру и образован наноразмерными частицами нитрида алюминия с гексагональной кристаллической решеткой. В приповерхностном слое в объеме зерен алюминия выявлено формирование наноразмерных частиц нитрида алюминия с гранцентрированной кубической кристаллической решеткой. Показано,

что после азотирования микротвердость алюминия в $\approx 7,7$ раза превышает микротвердость исходных образцов; параметр износа (величина, обратная износостойкости) в $\approx 4,7$ раза, а коэффициент трения в $\approx 1,2$ раза меньше соответствующих характеристик исходного алюминия марки А7. Выявлен режим комбинированной обработки, сочетающий азотирование в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком давлении, нанесение износостойкого покрытия на основе циркония и облучение системы «покрытие/подложка» интенсивным импульсным электронным пучком, позволяющий многократно (более чем в 90 раз) повысить износостойкость и снизить (в 3,5 раза) коэффициент трения технически чистого алюминия марки А7. Высказано предположение, что основной причиной повышения трибологических свойств технически чистого алюминия является формирование многослойной многофазной нанокристаллической структуры, представленной твердым оксинитридным покрытием на основе циркония, сформированном на слое нитрида алюминия, образованном в результате предварительного азотирования и модифицированного на заключительном этапе комбинированной обработки облучением интенсивным импульсным электронным пучком. Перспективным направлением дальнейшего развития данного подхода является использование разрабатываемого метода для модифицирования структуры и трибологических свойств промышленных сплавов на основе алюминия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00 091).

ЛИТЕРАТУРА

1. Золоторевский, В.С. Металловедение литейных алюминиевых сплавов / В.С. Золоторевский, Н.А. Белов. – Москва, МИСИС, 2005.
2. Белов, Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов / Н.А. Белов. – Москва, МИСИС, 2010.
3. Белов, Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов / Н.А. Белов. – Москва, МИСИС, 2009.
4. Veprek, S. The search for novel, superhard materials / S. Veprek // J. Vac. Sci. Technol. A, v. 17, pp. 2401–2420 (1999)
5. Musil, J. Hard and superhard nanocomposite coatings / J. Musil // Surface and coatings technology, v. 125, pp. 322–330 (2000)
6. Hocking, M.G. Metallic and ceramic coatings. Production, High temperature properties and applications / M.G. Hocking, V. Vasantasree, P.S. Sidky. – New York, John Wiley and Sons, Inc., 1989.
7. Superhard nanocrystalline Ti–Cu–N coatings deposited by vacuum arc evaporation of a sintered cathode / Yu.F. Ivanov [et al.] // Surface and Coatings Technology. – Vol. 207, 2012, pp. 430–434.
8. Углов, В.В. Структурно-фазовые превращения в алюминии, железе и его сплавах при комбинированных ионных и плазменных воздействиях / В.В. Углов. – дис. докт. физ.-мат. наук. Минск, 2006.
9. Якушин, В.Л. Модифицирование углеродистых и низколегированных сталей потоками высокотемпературной импульсной плазмы / В.Л. Якушин // Металлы, №2. С. 12–24 (2005)
10. Rotshtein, V. Surface treatment of materials with lowenergy, high-current electron beams, Materials surface processing by directed energy techniques / V. Rotshtein, Yu. Ivanov, A. Markov; ed. by Y. Pauleau. – Elsevier, Ch. 6, pp. 205–240 (2006)
11. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев [и др.]. – Минск: Беларус. Навука, 2013.
12. Интегрированные методы обработки конструкционных и инструментальных материалов в тлеющих и вакуумно-дуговых разрядах / В.В. Будилов [и др.]. – Москва, Машиностроение, 2013.
13. Модифицирование структуры и свойств легких сплавов упрочняющими технологиями / под ред. В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова – Новокузнецк, Полиграфист, 2015.
14. Берлин, Е.В. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей / Е.В. Берлин, Н.Н. Коваль, Л.А. Сейдман. – Москва, Техносфера, 2012.
15. Азотирование поверхности технически чистого алюминия в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом / О.В. Крысина [и др.] // Материалы 12-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, Беларусь, 2017. – С. 250–250.
16. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Под ред. Н.Н. Ковалья, Ю.Ф. Иванова. – Томск. Издательство НТЛ, 2016.

17. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под общ. ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова. – Томск, Изд-во НТЛ, 2016.
18. Генерация однородной низкотемпературной газовой плазмы в импульсном несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом большой площади / Ю.Х. Ахмадеев [и др.] // Физика плазмы, Т. 43, 2017. – с. 63–70.

REFERENCES

1. Zolotarevskiy V.S., Belov N.A. Metallovedenie litejnyh alyuminievyh splavov [Metallurgical science of foundry aluminum alloys] (Moscow, MISIS, 2005) (in Russian)
2. Belov N.A. Fazovyy sostav promyshlennyh i perspektivnyh alyuminievyh splavov [Phase composition of the industrial and perspective aluminum alloys] (Moscow, MISIS, 2010) (in Russian)
3. Belov N.A. Fazovyy sostav alyuminievyh splavov [Phase composition of aluminum alloys] (Moscow, MISIS, 2009) (in Russian)
4. Veprek S. The search for novel, superhard materials, J. Vac. Sci. Technol. A, v. 17, pp. 2401–2420 (1999)
5. Musil J. Hard and superhard nanocomposite coatings, Surface and coatings technology, v. 125, pp. 322–330 (2000)
6. Hocking M.G., Vasantasree V., Sidky P.S. Metallic and ceramic coatings. Production, High temperature properties and applications (New York, John Wiley and Sons, Inc., 1989)
7. Ivanov Yu.F., Koval N.N., Krysina O.V. et al., Superhard nanocrystalline Ti–Cu–N coatings deposited by vacuum arc evaporation of a sintered cathode, Surface and Coatings Technology, v. 207, pp. 430–434 (2012)
8. Uglov V.V. Strukturno-fazovye prevrashcheniya v alyumini, zheleze i ego splavah pri kombinirovannyh ionnyh i plazmennyyh vozdeystviyah [Structural phase transformations in aluminum, iron and its alloys at the combined ion and plasma influences] (dissertation of the doctor of physical and mathematical sciences, Minsk, 2006). (in Russian)
9. Yakushin V.L. Modificirovanie uglevodistykh i nizkolegirovannykh stalej potokami vysokotemperaturnoj impul'snoy plazmy [Modification of carbonaceous and low-alloy steels by high-temperature pulsed plasma], Metally, №2. pp. 12–24 (2005) [in Russian]
10. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Surface treatment of materials with lowenergy, high-current electron beams, Materials surface processing by directed energy techniques / ed. by Y. Pauleau. – Elsevier, Ch. 6, pp. 205–240 (2006)
11. Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A. et al, Modifikaciya struktury i svoystv ehvtekticheskogo silumina ehlektronno-ionno-plazmennoj obrabotkoj [Modification of the structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma treatment] (Minsk: Belarus. Navuka, 2013). (in Russian)
12. Budilov V.V., Koval N.N., Kireev R.M., Ramazanov K.N. Integrirrovannyye metody obrabotki konstrukcionnyh i instrumental'nyh materialov v tleyushchih i vakuumno-dugovykh razryadah [Integrated methods for processing of structural and tool materials in glow and vacuum arc discharges] (Moscow, Mashinostroenie, 2013). (in Russian)
13. Modificirovanie struktury i svoystv legkih splavov uprochnyayushchimi tekhnologiyami [Modification of the structure and properties of light alloys by reinforcing technologies] / ed. by V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, (Novokuznetsk, Poligrafist, 2015) [in Russian]
14. Berlin E.V., Koval N.N., Seidman L.A. Plazmennaya himiko-termicheskaya obrabotka poverhnosti stal'nyh detalej [Plasma chemical-thermal treatment of the surface of steel parts] (Moscow, Tekhnosfera, 2012). (in Russian)
15. Krysina O.V., Denisov V.V., Ostroverkhov E.V., Tolkachov O.S. Azotirovanie poverhnosti tekhnicheskhi chistogo alyuminiya v plazme nesamostoyatel'nogo tleyushchego razryada s polym katodom [Nitriding of the surface of technically pure aluminum in the plasma of a non-self-sustaining glow discharge with a hollow cathode], Materials of the 12th International conference «Interaction of Radiations with a Solid Body», Minsk, Belarus, pp. 250–250 (2017). (in Russian)
16. Ehvoluciya struktury poverhnostnogo sloya stali, podvergnutoj ehlektronno-ionno-plazmennym metodam obrabotki [Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma processing methods] / ed. by N.N. Koval, Yu.F. Ivanov (Tomsk. NTL Publ., 2016). (in Russian)
17. Ehlektronno-ionno-plazmennaya modifikaciya poverhnosti cvetnyh metallov i splavov [Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys] / ed. by N.N. Koval and Yu.F. Ivanov (Tomsk. NTL Publ., 2016). (in Russian)
18. Akhmadeev Yu.H., Denisov V.V., Koval N.N. et al, Generaciya odnorodnoj nizkotemperaturnoj gazovoy plazmy v impul'snom nesamostoyatel'nom tleyushchem razryade s polym katodom bol'shoj ploshchadi [Generation of a homogeneous low-temperature gas plasma in a pulsed non-self-sustaining glow discharge with a hollow cathode of a large area] , Fizika plazmy, Vol. 43, pp. 63–70 (2017). (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 12.03.18