

**ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКИ  
ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ, ПОДВЕРГНУТОГО КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ**

А.Р. Шамиева, А.Д. Тересов

Научный руководитель: профессор, д. ф.-м. н. Ю.Ф. Иванов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [shamieva\\_nastya@mail.ru](mailto:shamieva_nastya@mail.ru)

**IMPROVE THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF TECHNICALLY  
PURE ALUMINIUM SUBJECTED TO THE COMBINED PROCESSING**

A.R. Shamieva, A.D. Teresov

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Yu.F. Ivanov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [shamieva\\_nastya@mail.ru](mailto:shamieva_nastya@mail.ru)

***Abstract.** The results are presented, received at research of phase and elemental composition, defective substructure of surface technically pure aluminium of the A7, subjected to the combined processing combining spraying metal film, electron-beam mixing of system film / substrate and subsequent nitriding in plasma of the gas discharge of low pressure. The analysis of regularities is made, revealed the modes of influence allowing multiple to raise a microhardness and wear resistance of material.*

**Введение.** Для повышения долговечности, надежности и стойкости деталей машин и механизмов в агрессивных средах, при трении скольжения под большими давлениями в присутствии абразивных частиц целесообразно и достаточно упрочнять лишь поверхностные слои, а не всю деталь в целом [1-3].

Алюминий и его сплавы широко используются в промышленности благодаря достаточно большой удельной прочности, удовлетворительной коррозионной стойкости и хорошей обрабатываемости механическими методами [4]. Однако наряду с этими преимуществами алюминий обладает малой твердостью и невысокой износостойкостью. Диффузное насыщение поверхности алюминия ионами азота позволяет в той или иной мере минимизировать эти недостатки [5].

Целью работы является анализ трибологических и механических характеристик технически чистого алюминия, подвергнутого комбинированной обработке.

**Материал и методы исследования.** В качестве модифицируемого материала использовали технически чистый алюминий марки А7 (0,16 Fe, 0,15 Si, 0,04 Zn, 0,01 Cu, 0,01 Ti, остальное Al, вес. %) [6]. Комбинированная обработка алюминия проводилась в три этапа: 1) формирование пленки сплава 12X18H10T толщиной 0,5 мкм (модернизированная установка ионно-плазменного напыления «Квинта»); 2) облучение системы «пленка (сплав 12X18H10T) / (А7) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком (установка «СОЛО»); 3) азотирование модифицированной поверхности алюминия (установка ННВ-6.6-И1, дооснащенная плазмогенератором «ПИНК»), температура азотирования 540 °С, длительность азотирования 8 часов.

**Результаты.** Прочностные свойства поверхностного слоя технически чистого алюминия марки А7, подвергнутого комбинированной обработке, характеризовали величиной микротвердости, выявляемой методами микро- и наноиндентации (микротвердомер ПМТ-3 и нанотвердомер Nano Hardness Tester NHT-S-AX-000X). Результаты выполненных таким образом исследований представлены на рисунке 1. Отчетливо видно, что твердость модифицированных образцов максимальна на поверхности (в слое толщиной  $\approx 5$  мкм) и монотонно убывает по мере удаления от поверхности обработки. Твердость модифицированного слоя существенным образом зависит от режима облучения системы пленка/подложка интенсивным импульсным электронным пучком. Облучение электронным пучком с параметрами 16 кэВ, 30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 0,3 с<sup>-1</sup>, 10 имп. позволило повысить твердость образцов технически чистого алюминия марки А7 в  $\approx 7$  раз (рисунок 1, кривая 1).

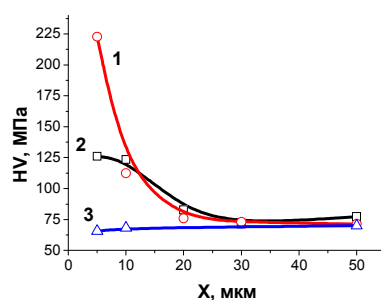


Рис. 1. Зависимость нанотвердости от расстояния до поверхности азотирования технически чистого алюминия А7: кривая 1 – напыление пленки 0,5 мкм стали 12Х18Н10Т + облучение электронным пучком (16 кэВ, 30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 0,3 с<sup>-1</sup>, 10 имп.) + азотирование в плазме газового разряда; кривая 2 – напыление пленки 0,5 мкм стали 12Х18Н10Т + облучение электронным пучком (16 кэВ, 30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 0,3 с<sup>-1</sup>, 20 имп.) + азотирование в плазме газового разряда; кривая 3 – напыление пленки 0,5 мкм стали 12Х18Н10Т + азотирование в плазме газового разряда.

Трибологические свойства модифицированного материала характеризовали параметром износа при испытаниях в условиях сухого трения. Испытания на износостойкость модифицированной поверхности проводили в геометрии диск-штифт с помощью трибометра PC-Operated High Temperature Tribometer THT-S-AX0000 (CSEM, Швейцария) при комнатной температуре. Анализ результатов, показывает, что износостойкость модифицированного слоя существенным образом зависит от режима модифицирования материала. Выявлены режимы модифицирования, позволяющие повысить износостойкость образцов технически чистого алюминия А7 в  $\approx 9$  раз; при этом коэффициент трения снижается в  $\approx 1,3$  раза. Таким режимом поверхностной обработки является следующий: напыление пленки нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 0,5 мкм, облучение системы «пленка (сталь 12Х18Н10Т) / (А7) подложка» высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (16 кэВ, 30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 0,3 с<sup>-1</sup>, 20 имп.), азотирование сформированного поверхностного сплава в плазме газового разряда (температура 540 °С (8 час.), ток 120 А, напряжение 250 В, давление газа 0,9 Па).

Очевидно, что выявленные изменения прочностных и трибологических характеристик технически чистого алюминия марки А7 обусловлены преобразованием фазового и элементного состава, а также дефектной субструктуры материала.

Анализ состояния дефектной субструктуры поверхности модифицирования осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что азотирование системы «пленка (сплав 12Х18Н10Т) / (А7) подложка» приводит к формированию на поверхности модифицирования островковой структуры с размерами островков до 0,6 мкм. Размеры субструктуры островков изменяются в пределах от 50 нм до 100 нм.

Выполненные, методами рентгеноструктурного анализа, исследования фазового состава модифицированного слоя, выявили формирование многофазного состояния, представленного алюминием, нитридом алюминия AlN и  $\alpha$ -Fe (Cr, Al) (рисунок 2).

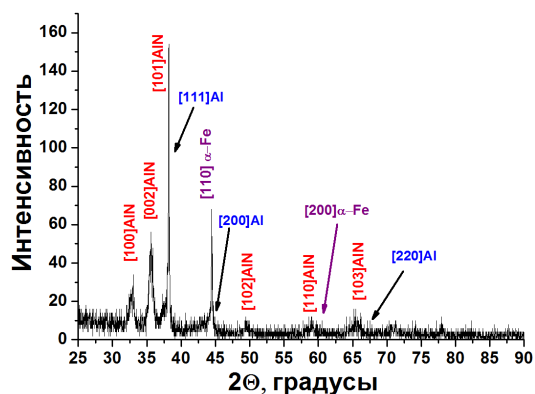


Рис. 2. Участок рентгенограммы, полученной с поверхностного слоя образцов технически чистого алюминия А7, подвергнутого комбинированной обработке.

**Заключение.** Таким образом, в результате выполненных исследований продемонстрирована возможность многократного увеличения трибологических и прочностных характеристик технически чистого алюминия марки А7, подвергнутого комплексному легированию поверхностного слоя путем облучения системы «пленка (сплав 12Х18Н10Т, 0,5 мкм) / (А7) подложка» интенсивным электронным пучком и последующему азотированию в плазме газового разряда низкого давления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 256 с.
2. Грибков В.А. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
3. К.К. Кадыржанов, Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк, В.С. Русаков, Т.Э. Туркебаев. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов: Монография – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 640 с.
4. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. – М.: Изд-во МИСиС, 2010. – 510 с.
5. Будилов В.В., Коваль Н.Н. Интегрированные методы обработки конструкционных и инструментальных материалов с использованием тлеющих и вакуумно-дуговых разрядов. – М.: Машиностроение, 2013. – 320 с.
6. Квасов Ф.И. Промышленные алюминиевые сплавы. - Справочное издание. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1984. - 528 с.