

## КОМБИНИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ: СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

Ю.Ф. Иванов, Н.А. Прокопенко, Е.А. Петрикова,  
А.Д. Тересов, И.В. Лопатин, О.С. Толкачев

*Институт сильноточной электроники СО РАН,  
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия, yufi55@mail.ru, nick08\_phantom@mail.ru,  
elizmarkova@yahoo.com, tad514@sibmail.com, lopatin@opee.hcei.tsc.ru, ole.ts@mail.ru*

Работа посвящена выявлению и анализу закономерностей изменения элементного и фазового составов, дефектной субструктуры, механических (микротвердость) и трибологических (износостойкость и коэффициент трения) свойств нержавеющей высокохромистой стали, подвергнутой комбинированной обработке, сочетающей напыление тонкой пленки титана, азотирование в условиях элионного нагрева образцов и последующее облучение в вакууме поверхностного слоя интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Напыление пленки титана на поверхность стали осуществлялось на установке «КВИНТА» вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным испарением катода из сплава VT1-0. Азотирование стали осуществлялось на установке «ТРИО». Облучение импульсным электронным пучком системы пленка/подложка осуществляли на установке «СОЛО». Показано, что комплексное модифицирование стали 20Х23Н18 приводит к формированию в поверхностном слое толщиной  $\approx 30$  мкм многоэлементной, многофазной градиентной субмикро- нанокристаллической структуры, представленной твердыми растворами на основе  $\alpha$ -,  $\gamma$ - и  $\varepsilon$ -Fe, нитридами титана, хрома и железа, соединением  $\text{Fe}_2\text{Ti}$ . Выявлен режим модификации, позволяющий увеличить износостойкость стали в 9.1 раза и микротвердость до 7.0 ГПа, что превышает микротвердость исходной стали в 3.7 раза.

**Ключевые слова:** нержавеющая сталь; вакуумно-дуговое плазменно-ассистированное напыление; азотирование; облучение импульсным электронным пучком; структура; свойства.

## COMBINED ELECTRON-ION-PLASMA PROCESSING OF STAINLESS STEEL: STRUCTURE AND PROPERTIES

Yu. Ivanov, N. Prokopenko, E. Petrikova, A. Teresov, I. Lopatin, O. Tolkachev  
*Institute of High Current Electronics SB RAS,*

*2/3 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russia, yufi55@mail.ru, nick08\_phantom@mail.ru,  
elizmarkova@yahoo.com, tad514@sibmail.com, lopatin@opee.hcei.tsc.ru, ole.ts@mail.ru*

The work is devoted to the identification and analysis of patterns of changes in the elemental and phase compositions, defect substructure, mechanical (microhardness) and tribological (wear resistance and friction coefficient) properties of high-chromium stainless steel subjected to complex processing combining the deposition of a thin titanium film, nitriding under conditions of elion heating of samples and subsequent irradiation in a vacuum of the surface layer with an intense pulsed electron beam of submillisecond duration. High-chromium steel AISI 310S, which in the initial state is a polycrystalline aggregate based on  $\gamma$ -iron, is used as the research material. Sputtering of a titanium film with a thickness of 1  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  and 5  $\mu\text{m}$  on the steel surface was carried out on the «KVINTA» installation by vacuum-arc evaporation of a cathode made of technically pure titanium grade VT1-0 in the plasma-assisted mode in an argon environment. Nitriding of steel was carried out on the «TRIO» installation with the chamber dimensions of 600x600x600 mm, equipped with a switching unit for the implementation of the elion (electron and ion) processing mode. Nitriding was carried out at a temperature of 793 K for 1 hour. Irradiation with a pulsed electron beam was carried out on the «SOLO» installation equipped with an electron source with a plasma cathode based on a low-pressure pulsed arc discharge with grid stabilization of the cathode plasma boundary and an open anode plasma boundary. It is shown that the complex modification of AISI 310S steel leads to the formation of a multi-element, multiphase gradient submicron-nanocrystalline structure in the surface layer  $\approx 30$   $\mu\text{m}$  thick, represented by solid solutions based on  $\alpha$ -,  $\gamma$ - and  $\varepsilon$ -Fe, titanium, chromium and iron nitrides, and  $\text{Fe}_2\text{Ti}$  compound. A modification mode has been identified that allows increasing the wear resistance of steel by 9.1 times and the microhardness to 7.0 GPa, which exceeds the microhardness of the original steel by 3.7 times.

**Keywords:** stainless steel; vacuum arc plasma-assisted spraying; nitriding; pulsed electron beam irradiation; structure; properties.

## Введение

Методы, основанные на использовании концентрированных потоков энергии (КПЭ) (лазерное излучение, высокоинтенсивные электронные и мощные ионные пучки, плазменные потоки и струи и т.д.) для упрочнения поверхности деталей машин и механизмов, в настоящее время широко используются в различных областях промышленности [1]. Это обусловлено как возможностью проводить обработку материала локально, только в тех местах, которые непосредственно испытывают экстремальные нагрузки в процессе эксплуатации детали, так и достигнутым уровнем развития оборудования для их реализации [2].

Целью настоящей работы является установление закономерностей эволюции структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали, подвергнутой комбинированному воздействию, сочетающему напыление тонкой пленки титана, азотирование в условиях элионного нагрева образцов и последующее облучение в вакууме поверхностного слоя интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия.

## Методика эксперимента

Объектом исследования являлась аустенитная жаропрочная коррозионностойкая сталь марки 20X23H18 (0.2C, 1.0Si, 0.30Cu, 2.0Mn, (17.0–20.0)Ni, 0.2Ti, 0.035P, (22.0–25.0)Cr, 0.02S, остальное Fe, вес.%). Формирование протяженных упрочненных поверхностных слоев осуществляли путем комбинированного электронно-ионно-плазменного воздействия: (1) вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления на поверхность стали тонкой (1, 3, 5 мкм) пленки титана (установка «КВИНТА»); (2) азотирования системы «пленка/подложка» в плазме газового разряда низкого давления (установка «ТРИО», дооснащенная блоком коммутации для реализации элионного (электронного и ионного) режима обработки [3]); (3)

сверхскоростного (до  $10^5$  К/с) плавления системы «пленка/подложка» интенсивным импульсным электронным пучком (установка «СОЛО»).

Элементный состав и структуру модифицированного слоя изучали методами растровой (Philips SEM-515, оснащенный микроанализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей (JEOL JEM-2100F) электронной микроскопии. Фазовый состав исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РФА, дифрактометр Shimadzu XRD-6000; геометрия Брегга – Брентано). Определение микротвердости осуществляли методом Виккерса (микротвердомер ПМТ-3, нагрузка на индентор 0.2 Н). Трибологические измерения проводили на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester в геометрии «шарик (BK8)-диск». Профили треков износа оценивали с помощью контактного профилометра («TRIBOtechnic», Франция).

## Результаты эксперимента и обсуждение

Установлено, что наиболее высокие значения микротвердости (7.0 ГПа, что превышает микротвердость исходной стали в 3.7 раза) зафиксированы на образцах стали после обработки (напыление+азотирование+облучение) при толщине напыленной пленки титана 5 мкм. Микротвердость стали увеличивается с ростом толщины напыленной пленки титана. Трибологические испытания модифицированной стали показали, что минимальное значение параметра износа ( $4.4 \cdot 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>/Н·м, что в 9.1 раза ниже параметра износа исходной стали) наблюдается при толщине напыленной пленки титана 3 мкм. Коэффициент трения достигает наименьших значений также при толщине пленки титана 3 мкм и равен 0.62, что в 1.4 раза меньше коэффициента трения исходной стали.

Методами рентгеноструктурного анализа установлено, что комбинированная обработка приводит к формированию многофазного поверхностного слоя, содержащего (при толщине напыленной пленки

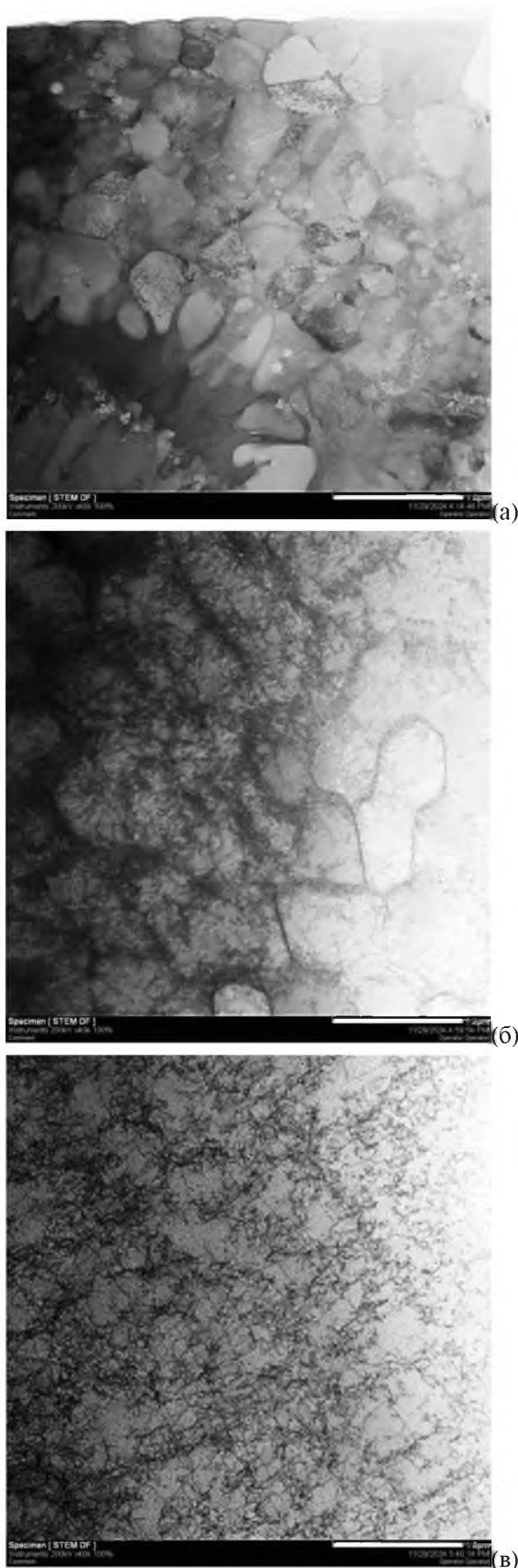


Рис. 1. Структура системы «пленка/подложка» на расстоянии (мкм) 0 (а), 30 (б), 50 (в) от поверхности обработки

титана 5 мкм)  $\gamma$ -Fe (12 мас.%);  $\alpha$ -Fe (33 мас.%); TiN (10 мас.%); Fe<sub>3</sub>N (23 мас.%) и Fe<sub>2</sub>Ti (22 мас.%).

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии установлено, что в поверхностном слое модифицированной стали формируется многофазная градиентная субмикро- нанокристаллическая структура (рис. 1).

### Закключение

Показано, что комбинированная обработка стали 20Х23Н18 приводит к формированию в поверхностном слое толщиной  $\approx 30$  мкм многоэлементной, многофазной градиентной субмикро- нанокристаллической структуры.

Выявлен режим модифицирования, позволяющий увеличить микротвердость стали до 7.0 ГПа, что превышает микротвердость исходной стали в 3.7 раза;

3. Выявлен режим модифицирования, позволяющий увеличить износостойкость стали в 9.1 раза.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер: FWRM-2021-0006).

### Библиографические ссылки

1. Surface Modification and alloying by Laser, Ion, and Electron Beams, Edited by J.M. Poate, G. Foti and D.C. Jacobson. New York and London: Plenum Press; 1983. 414 с.
2. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Коваль Н.Н. и др.; под ред. А.П. Ласковнева. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. Минск: Беларус. навука; 2013. 287 с.
3. Akhmadeev Yu.H., Ivanov Yu.F., Krysina O.V., Lopatin I.V., Petrikova E.A., Rygina M.E. Electron-ion-plasma modification of carbon steel. *High Temperature Material Processes* 2021; 25(1): 47-55.