

**КОМПЛЕКСНЫЙ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЙ  
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕТОД УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ  
БОРИДАМИ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ**

Иванов Ю.Ф., Шугуров В.В., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Толкачев О.С., Петюкевич М.С.  
*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск*

Бориды и борсодержащие материалы, в том числе и стали, нашли широкое применение в атомной энергетике, что обусловлено большим сечением захвата тепловых нейтронов у атомов бора [1]. Кроме этого, легированные изотопом  $^{10}\text{B}$  поверхности могут применяться для задач нейтронной физики, при создании детекторов нейтронов или для биологической защиты [2, 3]. Сдерживающими факторами широкого использования в промышленности существующих методик борирования являются длительность (несколько десятков часов) и высокая температура (1273–1473 К) процесса, формирование грубых включений боридов, снижающих механические свойства материала, низкий уровень экологичности, а, в отдельных случаях, взрывоопасность процесса.

Целью настоящих исследований является разработка основ комплексного электронно-ионно-плазменного метода борирования металлов и сплавов, сочетающего в различной последовательности напыление пленок бора и металла, облучение системы «пленка/подложка» интенсивным импульсным электронным пучком.

В качестве материала исследований использовали высокохромистую нержавеющую сталь марки 12X18H10T. Образцы имели форму пластинок размерами 10x10x5 мм. Перед модифицированием поверхность образцов механически шлифовали и полировали; после помещения в камеру установки и последующего вакуумирования – дополнительно кратковременно (15 мин.) очищали плазмой аргона. Процесс насыщения поверхностного слоя стали бором осуществляли на установке «КОМПЛЕКС». Предварительную обработку образцов осуществляли по следующей схеме: (1) облучение импульсным электронным пучком (18 кэВ, 20 Дж/см<sup>2</sup>, 50 мкс, 3 имп.) и (2) последующее плазменное борирование при температуре 1223 К в течение 3 часов. Формирование системы «пленка/подложка» осуществляли в три этапа. На первом этапе на подложку напыляли пленку бора толщиной 0,3 мкм, на втором - поверх пленки бора напыляли пленку циркония толщиной 1 мкм, на третьем – облучали систему «пленка (B)+пленка (Zr) / (сталь 12X18H10T) подложка» импульсным электронным пучком. Исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры системы «пленка (Zr+B) / (сталь 12X18H10T) подложка» проводили методами сканирующей (прибор SEM 515 Philips) и просвечивающей дифракционной (прибор JEOL JEM-2100F, Japan) электронной микроскопии. Твердость материала определяли по схеме Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н и нанотвердомере DUN-211S (Shimadzu, Japan) при нагрузке 10 мН. Исследование трибологических (коэффициент трения и параметр износа) характеристик материала осуществляли на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция).

Результаты, полученные при механических испытаниях модифицированного слоя стали 12X18H10T, выявили увеличение микротвердости более чем в 2 раза (до значения 5,4 ГПа). Трибологические испытания модифицированной стали выявили снижение параметра износа (увеличение износостойкости) в 15,4 раза, снижение коэффициента трения в 3,5 раза. Очевидно, что повышение механических и трибологических характеристик модифицированной стали обусловлено преобразованием структурно-фазового состояния материала.

Методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что в поверхностном слое стали относительное содержание бора 88 ат. %, циркония - 12 ат. %. Исследование дефектной субструктуры и фазовый анализ поверхностного слоя модифицированной стали, выполненное методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии фольг,

выявило формирование многослойной структуры (рис. 1). По морфологическому признаку можно выделить три слоя: поверхностный (слой 1), толщина которого (1-2) мкм; промежуточный слой (слой 2), толщина которого  $\approx 0,7$  мкм, и переходный слой (слой 3), толщина которого  $\approx 0,5$  мкм. Все три слоя имеют поликристаллическую структуру. Средние размеры кристаллитов в поверхностном слое (120-150) нм, в промежуточном слое (15-20) нм, в переходном слое (50-60) нм. В переходном слое кристаллиты формируют столбчатую структуру, что явно указывает на плавление слоя стали, контактирующего с напыленным слоем бора. Можно предположить, что формирование многослойной структуры обусловлено многоэтапным характером обработки стали: слои 2 и 3 сформировались в результате предварительной обработки стали, слой 1 – на заключительном этапе в результате облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком.

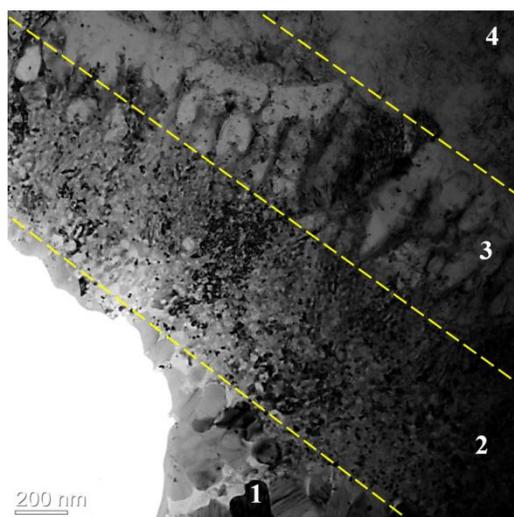


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного модифицированного слоя стали 12X18H10T

Таким образом, комплексное высокоскоростное модифицирование поверхностного слоя стали 12X18H10T, сочетающее в различной последовательности плазменное борирование, напыление пленок бора и циркония, облучение интенсивным импульсным электронным пучком, позволило многократно увеличить износостойкость и микротвердость стали, что обусловлено формированием многослойного многофазного субмикронанокристаллического поверхностного слоя, упрочненного частицами второй фазы.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/>.*

1. Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С. Борирование стали. Москва: Металлургия. – 1978.
2. Polo M.C., Martinez E., Esteve J., Andujar J. Micromechanical Properties of BN and B–CN Coatings Obtained by RF Plasma-Assisted CVD // *Diam. Relat. Mater.* 1999. V. 8. P. 423–27.
3. Eaglesham D.J., Stolk P.A., Gossmann H.J., Poate J.M. Implantation and transient B diffusion in Si: The source of the interstitials // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 65 2305–2307.