

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 533.9:539.4.015.2

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.007

## ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТАЛИ, СОДЕРЖАЩИХ СИЛИЦИДЫ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Николай Николаевич Коваль<sup>1</sup>, Юрий Федорович Иванов<sup>2†</sup>,  
Елизавета Алексеевна Петрикова<sup>3</sup>, Владимир Викторович Шугуров<sup>4</sup>,  
Антон Дмитриевич Тересов<sup>5</sup>, Илья Викторович Лопатин<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия

<sup>1</sup> koval@opec.hcei.tsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5339-7994>

<sup>2</sup> yufi55@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

<sup>3</sup> petrikova@opec.hcei.tsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1959-1459>

<sup>4</sup> shugurov@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6148-9442>

<sup>5</sup> tad514@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5363-0108>

<sup>6</sup> lopatin@opec.hcei.tsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5192-871X>

**Аннотация.** Результатом модификации поверхности металлов и сплавов путем комбинированной обработки (напыления тонких металлических пленок с последующим перемешиванием под действием высокоинтенсивных потоков энергии) является формирование градиентной структуры поверхностного слоя материала, характеризующейся изменяющимися по глубине концентрацией легирующих элементов, фазовым составом и состоянием дефектной субструктуры, что положительно сказывается на механических и трибологических свойствах материала. Целью настоящей работы является формирование высокопрочных силицидо- и нитридосодержащих поверхностных слоев при комплексной обработке в едином вакуумном цикле, включающей нанесение покрытий тугоплавкого металла и кремния, облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком и дополнительное азотирование в плазме газового разряда низкого давления. Модифицирование, сочетающее многоцикловое (до пяти циклов облучения системы «пленка/подложка») высокоскоростное плавления системы «пленка (Si (0.2 мкм) + Nb (0.2 мкм))/(сталь 40X) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «КОМПЛЕКС» (Институт сильноточной электроники СО РАН) в едином вакуумном пространстве. Часть образцов была дополнительно подвергнута азотированию в плазме газового разряда низкого давления (773–873 К, 1–5 час.). Выполнены исследования и выявлен режим комплексного модифицирования, позволивший многократно повысить износостойкость (более чем в 100 раз) и микротвердость (более чем в 5 раза) поверхностного слоя исходной стали. Высказаны предположения о физической природе повышения трибологических и прочностных свойств материала.

**Ключевые слова:** сталь, комплексное модифицирование, импульсный электронный пучок, азотирование, плазма газового разряда, структура, микротвердость, износостойкость.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 19-08-00248 (комплексное модифицирование поверхностного слоя стали) и гранта Российского научного фонда № 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/> (исследование структуры и свойств модифицированного материала).

**Для цитирования:** Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Шугуров В.В., Тересов А.Д., Лопатин И.В. Формирование электронно-ионно-плазменным методом поверхностных слоев стали, содержащих силициды тугоплавких металлов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 1. С. 59–65. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.007.

Original article

**FORMATION BY THE ELECTRON-ION-PLASMA METHOD OF STEEL SURFACE LAYERS CONTAINING SILICIDES OF REFRACTORY METALS****Nikolai N. Koval<sup>1</sup>, Yurii F. Ivanov<sup>2†</sup>, Elizaveta A. Petrikova<sup>3</sup>, Vladimir V. Shugurov<sup>4</sup>, Anton D. Teresov<sup>5</sup>, Iliia V. Lopatin<sup>6</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademichesky Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia<sup>1</sup> koval@opee.hcei.tsc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5339-7994><sup>2</sup> yufi55@mail.ru<sup>†</sup>, <http://orcid.org/0000-0001-8022-7958><sup>3</sup> petrikova@opee.hcei.tsc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1959-1459><sup>4</sup> shugurov@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6148-9442><sup>5</sup> tad514@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5363-0108><sup>6</sup> lopatin@opee.hcei.tsc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5192-871X>

**Abstract.** The result of the modification of the surface of metals and alloys by combined treatment (deposition of thin metal films with subsequent mixing under the action of high-intensity energy flows) is the formation of a gradient structure of the surface layer of the material, characterized by depth-changing concentration of alloying elements, phase composition and the state of the defective substructure, which has a positive effect on mechanical and tribological properties of the material. The aim of this work is the formation of high-strength silicide- and nitride-containing surface layers during combined processing in a single vacuum cycle, including the deposition of coatings of refractory metal and silicon, irradiation with a high-intensity pulsed electron beam, and additional nitriding in a low-pressure gas discharge plasma. Modification combining multi-cycle (up to five cycles of irradiation of the «film/substrate» system) high-speed melting of the «film (Si (0.2 μm)+Nb (0.2 μm))/(40Cr steel) substrate» system with an intense pulsed electron beam was carried out using the COMPLEX installation (Institute of High-Current Electronics SB RAS) in a single vacuum space. Some of the specimens were additionally subjected to nitriding in a low-pressure gas discharge plasma (773-873 K, 1-5 hours). Studies were carried out and a combined modification mode, which made it possible to repeatedly increase the wear resistance (more than 100 times) and microhardness (more than 5 times) of the surface layer of the original steel was identified. Assumptions about the physical nature of the increase in the tribological and strength properties of the material were proposed.

**Keywords:** steel, combined modification, pulsed electron beam, nitriding, gas discharge plasma, structure, microhardness, wear resistance.

**Acknowledgements:** The study was supported by RFBR grant No. 19-08-00248 (combined modification of the surface layer of steel) and the Russian Science Foundation grant No. 19-19-00183 (<https://rscf.ru/project/19-19-00183/>) (study of the structure and properties of the modified material).

**For citation:** Koval, N. N., Ivanov, Yu. F., Petrikova, E. A., Shugurov, V. V., Teresov, A. D. & Lopatin, I. V. (2023). Formation by the electron-ion-plasma method of steel surface layers containing silicides of refractory metals. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(1), 59–65. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.007.

## Введение

Результаты последних исследований выявили перспективность модификации поверхности металлов и сплавов путем комбинированной обработки – напыления тонких металлических пленок с последующим перемешиванием под действием высокоинтенсивных потоков энергии [1, 2]. Следствием такой обработки является градиентное строение поверхностного слоя материала, характеризующееся изменяющимися по глубине концентрацией легирующих элементов, фазовым составом и состоянием дефектной субструктуры. Существенным недостатком такого состояния является нерав-

новесный характер формирующихся структур, что приводит к снижению свойств материала при длительной выдержке при повышенных температурах. В работах [3-5] было показано, что одним из перспективных классов термически стабильных соединений (в том числе и в воздушной атмосфере) являются силициды тугоплавких металлов (Nb, Mo, Zr, Cr, Ti), которые обладают высокой температурой плавления, низкой диффузионной подвижностью кислорода в их кристаллической решетке. Силициды таких металлов рассматриваются в последнее время как кандидаты для замены никелевых суперсплавов при изготовлении лопаток

газовых турбин. Силициды ниобия и титана являются интересными как с научной, так и с технологической точки зрения ввиду их высокой температуры плавления, низкой плотности, по сравнению с никелевыми суперсплавами, и высокого сопротивления высокотемпературной ползучести. Известно, что силициды проявляют ограниченную способность к пластической деформации, что существенно сужает сферу их практического использования [6]. Следует ожидать, что синтез силицидосодержащих слоев с помощью высокоэнергетического электронно-пучкового воздействия позволит сформировать поверхностные слои, упрочненные наноразмерными частицами силицидов, сочетающие повышенную термическую стабильность, высокие механические и трибологические свойства.

Целью настоящей работы является формирование высокопрочных силицидо- и нитридо-содержащих поверхностных слоев при комплексной обработке в едином вакуумном цикле, включающей нанесение покрытий тугоплавкого металла и кремния, облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком и дополнительное азотирование в плазме газового разряда низкого давления.

### Материал и методики исследования

В качестве объекта исследования использована активно применяемая во многих отраслях промышленности низколегированная конструкционная сталь марки 40X ((0.31-0.44)C-(0.17-0.37)Si-(0.5-0.8)Mn-0.3Ni-0.035S-0.035P-(0.8-1.1)Cr-0.3Cu, остальное – Fe, вес. %). Образцы имели форму цилиндров высотой 10 мм и диаметром 12 мм. Обрабатываемая сторона образцов была отполирована до 10 класса чистоты. Модифицирование поверхностного слоя стали осуществляли комплексным электронно-ионно-плазменным методом в многоцикловом (1, 3, 5 циклов) режиме. Один цикл модифицирования состоял из (1) электродугового плазменно-ассистированного напыления на полированную поверхность образцов стали тонкой (0,2 мкм) пленки кремния; (2) последующего напыления на пленку кремния тонкой (0,2 мкм) пленки ниобия; (3) сверхскоростного (до  $10^5$  К/с) плавления системы «пленка (Si+Nb)/(сталь 40X) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком. После одного, трех и пяти циклов модифицирования часть

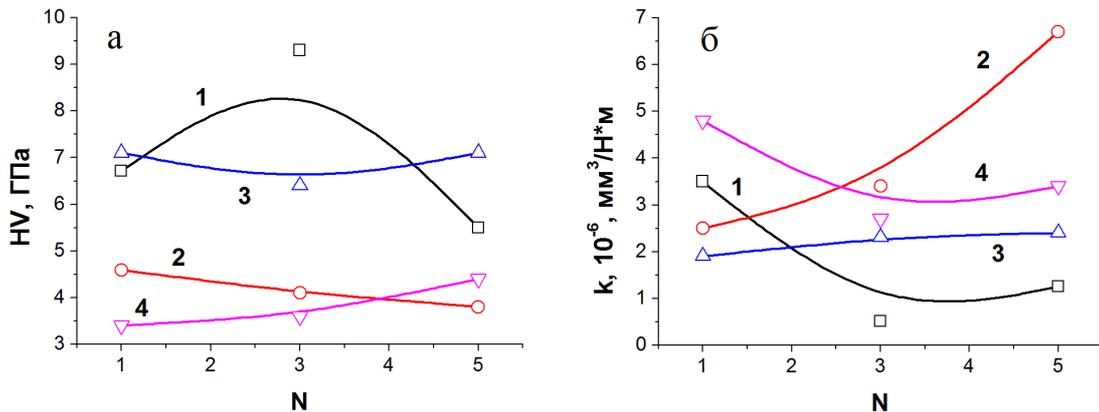
образцов подвергались дополнительному азотированию в плазме газового разряда низкого давления.

Обработку системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком проводили при двух режимах, отличающихся плотностью энергии пучка электронов (20 и 50) Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса 200 мкс, количество импульсов 3 и 30, энергия ускоренных электронов 18 кэВ, частота следования импульсов 0,3 с<sup>-1</sup>, облучение проводили в остаточной атмосфере аргона при давлении 0,02 Па. Ранее в [2] методами математического моделирования поля температур, формирующегося при обработке, было показано, что выбранные режимы облучения соответствуют разной степени высокоскоростного плавления поверхностного слоя стали. Азотирование осуществляли при температурах (773, 823, 873) К в течение (1-5) час. в плазме газового разряда низкого давления. Все указанные процессы модифицирования (формирование системы «пленка/подложка», облучение интенсивным импульсным электронным пучком, азотирование) поверхностного слоя стали осуществлены в едином вакуумном цикле на уникальной электрофизической установке «КОМПЛЕКС», созданной в Институте сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН) и входящей в перечень уникальных электрофизических установок России (в составе комплекса УНИКУУМ, <http://ckp-rf.ru/usu/434216/>) [7]. Структуру и фазовый состав стали исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (прибор SEM 515 Philips) и рентгенофазового анализа (дифрактометр XRD-6000, CuK $\alpha$ -излучение). Анализ элементного состава стали осуществляли методами SEM/EDAX (микрорентгеноспектральный анализ, микроанализатор EDAX ECON IV, установленный на сканирующем электронном микроскопе). Свойства стали характеризовали микротвердостью (прибор ПМТ-3, нагрузка на индентор 0,5 Н), параметром износа (величина, обратная износоустойчивости) и коэффициентом трения. Трибологические испытания осуществляли на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция); параметры испытаний: шарик из твердого сплава ВК8 диаметром 6 мм, радиус трека – 4 мм, нагрузка на индентор 10 Н, скорость вращения образца 25 мм/с, температура испытаний комнатная; степень износа материала определяли по результатам профилометрии канавки износа.

### Результаты и их обсуждение

На рис.1а приведены результаты, полученные при определении микротвердости поверхностного слоя стали, модифицированной при облучении импульсным электронным пучком системы «пленка/подложка». Установлено, что максимальное значение микротвердости поверхностного слоя модифицированной стали 40Х, равное 9300 МПа (в 3,2 раза превышающее твердость стали 40Х в исходном состоя-

нии), достигается после 3 циклов напыления/облучения (параметры облучения 20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.) (рис.1а, кривая 1). Увеличение количества импульсов до 30 при данных параметрах облучения приводят к существенно меньшим значениям твердости модифицированной стали (рис.1а, кривая 2). Подобная закономерность отмечается и для модифицирования стали с использованием электронного пучка с плотностью энергии 50 Дж/см<sup>2</sup> (рис.1а, кривые 3 и 4).



**Рис.1.** Зависимость микротвердости (а) и параметра износа (б) поверхностного слоя системы «пленка (Si (0,2 мкм)+Nb (0,2 мкм)) / (сталь 40Х) подложка» от количества циклов модифицирования. Режимы облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком: 20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. (кривая 1); 20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 30 имп. (кривая 2); 50 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. (кривая 3); 50 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 30 имп. (кривая 4). Твердость стали 40Х в исходном состоянии 2,9 ГПа; параметр износа стали 40Х в исходном состоянии 46,2·10<sup>-6</sup> мм<sup>3</sup>/Н·м

**Fig.1.** Dependence of microhardness (a) and wear parameter (b) of the surface layer of the «film (Si (0.2 μm)+Nb (0.2 μm))/(40Cr steel) substrate» system on the number of modification cycles. Modes of irradiation of the «film/substrate» system with a pulsed electron beam: 20 J/cm<sup>2</sup>, 200 μs, 3 pulses (curve 1); 20 J/cm<sup>2</sup>, 200 μs, 30 pulses (curve 2); 50 J/cm<sup>2</sup>, 200 μs, 3 pulses (curve 3); 50 J/cm<sup>2</sup>, 200 μs, 30 pulses (curve 4). The hardness of 40Cr steel in the initial state is 2.9 GPa; the wear parameter of 40Cr steel in the initial state is 46.2·10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>/N·m

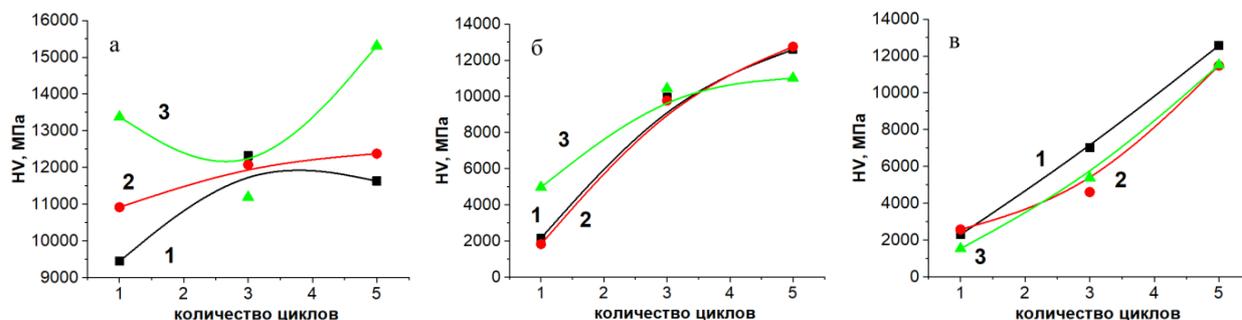
Зависимости параметра износа (величина, обратная износостойкости) поверхности стали 40Х от количества циклов модифицирования, приведены на рис.1б. Анализируя представленные результаты, можно констатировать, что минимальный параметр износа модифицированной стали 40Х (максимальная износостойкость) наблюдается после трех циклов обработки при параметрах пучка электронов 20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. (рис.1б, кривая 1), что более чем в 90 раз меньше параметра износа стали 40Х в исходном (феррито-перлитная структура) состоянии. Минимальный коэффициент трения модифицированной стали 40Х наблюдается при одном цикле обработки при параметрах пучка электронов 20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 30 имп. и составляет 0,39, что более чем на 10 % меньше коэффициента трения стали 40Х в исходном состоянии.

Таким образом, в результате механических и трибологических испытаний выявлен режим модифицирования стали 40Х, а именно, 3 цикла напыления/облучения (20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.), позволяющий сформировать поверхностный слой, легированный кремнием и ниобием, микротвердость которого в 3,2 раза, а износостойкость – более чем в 90 раз выше соответствующих характеристик стали 40Х в исходном состоянии.

Учитывая результаты, представленные выше, дополнительному азотированию подвергали образцы, подвергнутые многоцикловогому (1, 3, 5 циклов) модифицированию при параметрах пучка электронов 20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. Результаты, полученные при исследовании микротвердости азотированных образцов стали 40Х, приведены на рис.2. Анализируя представленные результаты, можно отметить,

что дополнительное азотирование образцов сопровождается ростом микротвердости стали с увеличением количества циклов модифицирования. Максимальное значение микротвердости достигается на образцах, подвергнутых пятицикловогой обработке и последующему азотированию при температуре 773 К в течение 5 часов

(рис.2, кривая 3) и составляет 15,3 ГПа. Следовательно, комплексная обработка – пятицикловое модифицирование и последующее азотирование при 773 К в течение 5 часов, позволяет увеличить твердость поверхностного слоя стали более чем в 5 раз.



**Рис.2.** Зависимость от количества циклов модифицирования микротвердости поверхностного слоя образцов стали 40Х, подвергнутых азотированию при температурах 773 К (а), 823 К (б) и 873 К (в) в течение 1 час. (кривая 1), 3 час. (кривая 2), 5 час. (кривая 3)

**Fig.2.** Dependence of the microhardness of the surface layer of 40Cr steel specimens subjected to nitriding at temperatures of 773 K (a), 823 K (b) and 873 K (c) for 1 h (curve 1), 3 h (curve 2), 5 h (curve 3) on the number of cycles of modification

Результаты трибологических испытаний стали 40Х, подвергнутой комплексной обработке (многоцикловогой обработке и последующее азотирование), показали, что модифицирование поверхностного слоя стали позволяет многократно понизить параметр износа (повысить износостойкость) материала. Наиболее высокие значения износостойкости (низкие значения параметра износа  $k$ ) материала выявлены при следующих режимах модифицирования: (1) 3-х цикловогой обработке и последующее азотирование при 773 К, 1 час. ( $k = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ); (2) 5-ти цикловогой обработке и последующее азотирование при 823 К, 1 час. ( $k = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ); (3) 3-х цикловогой обработке и последующее азотирование при 873 К, 3 часа ( $k = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ). Сопоставляя с результатами трибологических испытаний стали 40Х в исходном состоянии ( $k = 462 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ), можно отметить многократное (более чем в 320 раз) увеличение износостойкости модифицированного материала. Сопоставление с образцами стали после многоцикловогой обработки выявило повышение износостойкости азотированных образцов более чем в 3,5 раза. Менее значимо изменяется коэффициент трения ( $\mu$ ): в лучшем случае (1 цикл легирования с последующим азотированием при 773 К, 5 часов)  $\mu = 0,31$ , что меньше коэффициента трения исходной стали в 1,4 раза; относи-

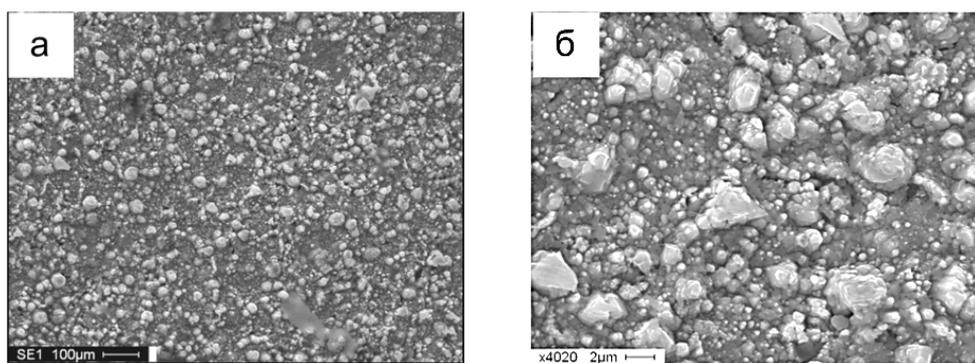
тельно стали, подвергнутой многоцикловогой обработке – меньше в 1,26 раз.

Установлено, методами микрорентгеноспектрального анализа, что концентрация азота в поверхностном слое стали увеличивается с ростом (1) количества циклов легирования (при одинаковых значениях температуры и времени азотирования); (2) температуры азотирования (при одинаковых значениях циклов легирования и времени азотирования); (3) времени азотирования (при одинаковых значениях циклов легирования и температуры азотирования).

Показано, что модифицирование стали сопровождается формированием на поверхности образцов островковой структуры (рис.3).

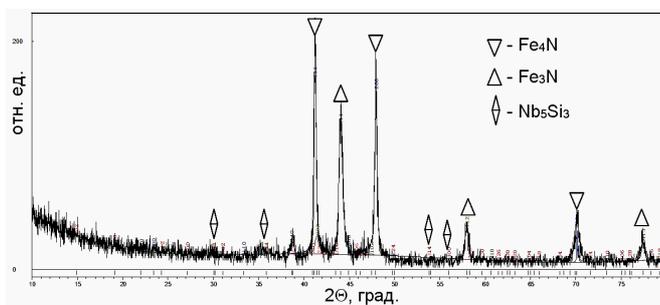
Повышение температуры азотирования от 773 К до 873 К сопровождается увеличением размеров и количества островков. Методами микрорентгеноспектрального анализа показано, что островки обогащены атомами азота и ниобия, что предполагает образование нитрида ниобия.

Методами рентгеноструктурного анализа показано, что основными упрочняющими фазами модифицированного слоя являются нитриды  $\text{Fe}_4\text{N}$ ,  $\text{Fe}_3\text{N}$  и силицид  $\text{Nb}_5\text{Si}_3$ ; твердые растворы на основе  $\alpha\text{-Fe}$  или  $\gamma\text{-Fe}$  в поверхностном слое стали 40Х не обнаружены (рис.4), т.е. формируется поверхностный слой, содержащий исключительно нитриды железа и силициды ниобия.



**Рис.3.** Структура поверхности образца стали 40Х, подвергнутой комплексному модифицированию, сочетающему облучение системы «пленка (Si (0,2 мкм)+Nb (0,2 мкм) / (сталь 40Х) подложка) импульсным электронным пучком (20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.) (3 цикла) и последующее азотирование при температуре 773 К в течение 1 часа (а) и 5 часов (б)

**Fig.3.** The surface structure of a 40Cr steel specimen subjected to complex modification, combining the irradiation of the «film (Si (0.2 μm))+Nb (0.2 μm)/(40Cr steel) substrate» system with a pulsed electron beam (20 J/cm<sup>2</sup>, 200 μs, 3 pulses) (3 cycles) and subsequent nitriding at a temperature of 773 K for 1 hour (a) and 5 hours (b)



**Рис.4.** Участок рентгенограммы образца стали 40Х, подвергнутой комплексному модифицированию, сочетающему облучение системы «пленка (Si (0,2 мкм)+Nb (0,2 мкм) / (сталь 40Х) подложка) импульсным электронным пучком (20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.) (5 циклов) и последующее азотирование в течение 1 часа при температуре 823 К

**Fig.4.** Section of the X-ray diffraction pattern of a 40Cr steel specimen subjected to complex modification, combining irradiation of the «film (Si (0.2 μm)) + Nb (0.2 μm)/(40Cr steel) substrate» system with a pulsed electron beam (20 J/cm<sup>2</sup>, 200 μs, 3 pulses) (5 cycles) and subsequent nitriding for 1 hour at a temperature of 823 K

### Выводы

Таким образом, комплексное модифицирование поверхностного слоя стали 40Х, сочетающее облучение системы «пленка (Si (0,2 мкм)+Nb (0,2 мкм) / (сталь 40Х) подложка) импульсным электронным пучком (20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.) (1-5 циклов) и последующее азотирование при вариации температуры (773-873) К и времени (1-5) час. позволило многократно увеличить износостойкость и микротвердость стали, что обусловлено формированием поверхностного слоя, упрочненного частицами второй фазы (нитридами и силицидами железа и ниобия).

Формирование поверхностного слоя стали 40Х, обладающего высокими значениями износостойкости и твердости, позволяет существенно расширить сферу возможных применений

материала, включая изготовление инструмента для экструзированного прессования легких металлов (алюминия), инструментальных штампов для горячего прессования, изготовления пар трения широкого назначения и других деталей и узлов, где в настоящее время используются дорогостоящие высоколегированные труднообрабатываемые стали.

### Список литературы

1. Shimansky V.I., Uglov V.V., Cherenda N.N., Astashinsky V.M., Kuzmitsky A.M. Modification of structure and mechanical properties of titanium alloys by compression plasma flows influence // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 12–3. С. 128–32.
2. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электроионно-

плазменным методам обработки / под общ. ред. Н.Н. Ковалья и Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 304 с.

3. Veprek S., Reiprich S. A concept for the design of novel superhard coatings // *Thin Solid Films*. 1995. V. 268, Is. 1–2. P. 64–71.

4. Liu W., Fu Y., Sha J. Microstructure and mechanical properties of Nb–Si alloys fabricated by spark plasma sintering // *Progress in Natural Science: Materials International*. 2013. V. 23, Is. 1. P. 55–63.

5. Cao G.H., Jian G.Y., Liu N., Zhang W.H., Russell A.M., Gerthsen D. Microstructure and mechanical properties of an ultrafine Ti–Si–Nb alloy // *Materials Chemistry and Physics*. 2015. V. 163. P. 512–517.

6. Диаграммы состояния двойных металлических систем / под ред. Н.П. Лякишева. Москва: Машиностроение, 2001. 872 с.

7. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Девятков В.Н., Шугуров В.В., Тересов А.Д., Петрикова Е.А. Развитие комплексного электронно-ионно-плазменного метода модификации поверхности материалов и изделий // *Известия ВУЗов. Физика*. 2020. Т. 63, № 10. С. 174–183.

#### Информация об авторах

Н. Н. Коваль – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

Е. А. Петрикова – младший научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

В. В. Шугуров – научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

А. Д. Тересов – научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

И. В. Лопатин – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

#### References

1. Shimansky, V. I., Uglov, V. V., Cherenda, N. N., Astashinsky, V. M. & Kuzmitsky, A. M. (2012). Modification of structure and mechanical

properties of titanium alloys by compression plasma flows influence. *Izvestiya VUZov. Fizika*, 12–3(55), 128–32. (In Russ.).

2. Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma processing methods (2016). Ed. by N. N. Koval and Yu. F. Ivanov. Tomsk: NTL Publishing House. P. 304. (In Russ.).

3. Veprek, S. & Reiprich, S. (1995). A concept for the design of novel superhard coatings. *Thin Solid Films*, 1–2(268), 64–71.

4. Liu, W., Fu, Y. & Sha, J. (2013). Microstructure and mechanical properties of Nb–Si alloys fabricated by spark plasma sintering. *Progress in Natural Science: Materials International*, 1(23), 55–63.

5. Cao, G. H., Jian, G. Y., Liu, N., Zhang, W. H., Russell, A. M. & Gerthsen, D. (2015). Microstructure and mechanical properties of an ultrafine Ti–Si–Nb alloy. *Materials Chemistry and Physics*, (163), 512–517.

6. State Diagrams of Binary Metallic Systems (2001). Ed. by N. P. Lyakisheva. Moscow: Mashinostroenie. P. 872. (In Russ.).

7. Koval, N.N., Ivanov, Yu.F., Devyatkov, V. N., Shugurov, V. V., Teresov, A. D. & Petrikova, E. A. (2020). Development of a complex electron-ion-plasma method for modifying the surface of materials and products. *Izvestiya VUZov. Fizika*, 10(63), 174–83. (In Russ.).

#### Information about the authors

N. N. Koval – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.

Yu. F. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.

E. A. Petrikova – Junior Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.

V. V. Shugurov – Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.

A. D. Teresov – Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.

I. V. Lopatin – Ph.D., Senior Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023; одобрена после рецензирования 24.01.2023; принята к публикации 07.02.2023.

The article was received by the editorial board on 10 Jan. 23; approved after reviewing 24 Jan. 23; accepted for publication 07 Feb. 23.