

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 621.793.182

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.013

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ БОРА, НАНЕСЕННОГО МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ И МОДИФИЦИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Юрий Федорович Иванов^{1†}, Георгий Юрьевич Юшков²

^{1,2} Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия

¹ yufi55@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

² gyushkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7615-6058>

Аннотация. Разработана методика нанесения покрытий бора на поверхность с использованием планарного магнетрона постоянного тока с мишенью из чистого непроводящего, при нормальных условиях, кристаллического бора. Скорость нанесения покрытия бора при мощности магнетронного разряда уровня 40 Вт составляла около 3,5 нм/мин. Покрытие было модифицировано электронным пучком в среде азота с энергией электронов 5 кэВ и плотностью тока пучка 5 мА/см². Приводятся параметры и свойства таких покрытий толщиной 1,1±0,1 мкм, нанесенных на нержавеющую сталь 12Х18Н10Т. Определена плотность, исследована морфология покрытия, микротвердость и модуль Юнга. Определено влияние электронно-пучкового воздействия на поверхность покрытия, исследован его элементный состав. Показано, что доля атомов бора в покрытии варьируется от 70,7 ат. % до 88,5 ат. %. Методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии обнаружено, что покрытие бора является аморфно-кристаллическим, т.е. содержит в объеме аморфной фазы кристаллические включения с размерами 3-7 нм. Выявлено наличие фаз боридов и гексаборидов хрома в приповерхностных областях подложки.

Ключевые слова: магнетронное нанесение покрытий, непрерывный электронный пучок, пленки бора, фазовый состав, дефектная структура, свойства.

Благодарности: Работа поддержана Российским Научным Фондом. Исследования по формированию и электронно-пучковой модификации покрытий бора, по изучению их морфологии и механических свойств выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00381, <https://rscf.ru/project/22-29-00381/>. Исследования свойств покрытий методами оптической, сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии выполнены за счет проекта Российского научного фонда № 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/>.

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Юшков Г.Ю. Структура и свойства покрытия бора, нанесенного методом магнетронного распыления и модифицированного электронным пучком // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 4. С. 539–545. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.013.

Original article

STRUCTURE AND PROPERTIES OF BORON COATING DEPOSITED BY MAGNETRON SPUTTERING AND MODIFIED BY ELECTRON BEAM

Yurii F. Ivanov^{1†}, Georgy Yu. Yushkov²

^{1,2} Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademichesky Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia

¹ yufi55@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

² gyushkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7615-6058>

Abstract. A technique for deposition of boron coatings on a surface using a planar DC magnetron with a target made from pure crystalline, non-electrically-conducting (under normal conditions) boron has been developed. The

deposition rate of the boron coating with a magnetron discharge of 40 W power was about 3.5 nm/min. The coating was modified by an electron beam in a nitrogen atmosphere. The electron energy of the beam was 5 keV and a beam current density was 5 mA/cm². The parameters and properties of those coatings with a thickness of $1.1 \pm 0.1 \mu\text{m}$, deposited on stainless steel 12Cr18Ni10Ti, are presented. Density, coating morphology, microhardness and Young's modulus of boron coatings were investigated. The effect of electron-beam modification on the coating surface was determined, and its elemental composition was studied. It was shown that the fraction of boron atoms in the coating varies from 70.7 to 88.5 at. %. Using X-ray diffraction analysis and transmission electron microscopy, it was found that the boron coating is amorphous-crystalline, i.e. contains crystalline inclusions with sizes of 3-7 nm in the volume of the amorphous phase. The presence of phases of borides and hexaborides of chromium in the subsurface regions was found.

Keywords: magnetron coating, DC electron beam, boron films, phase composition, defect structure, coating properties.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation. Studies on the formation and electron beam modification of boron coatings, as well as the studies of their morphology and mechanical properties were carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 22-29-00381, <https://rscf.ru/project/22-29-00381/>. Studies of coating properties by optical, scanning and transmission diffraction electron microscopy were carried out at the expense of the Russian Science Foundation project No. 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/>.

For citation: Ivanov, Yu. F. & Yushkov, G. Yu. (2022). Structure and properties of boron coating deposited by magnetron sputtering and modified by electron beam. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(19), 539–545. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.013.

Введение

Поиск путей улучшения эксплуатационных характеристик металлов и сплавов представляется важной задачей современного материаловедения. Поскольку эксплуатационные характеристики большинства изделий определяются свойствами их поверхности, то нанесение покрытий, улучшающих эти свойства, является путем решения этой задачи. Среди методов нанесения покрытий в последнее время интенсивно развиваются плазменные методы, к которым относится магнетронное напыление [1]. Магнетронное напыление позволяет наносить на поверхность покрытия из требуемых материалов, обеспечивая улучшение её служебных свойств [2].

Среди разнообразия получаемых защитных покрытий интерес представляют покрытия на основе бора. Борирование поверхности деталей из сталей и сплавов позволяет повысить их функциональные свойства [3]. Кристаллический бор и его соединения имеют высокую твердость [4, 5], а бор в аморфном состоянии может использоваться как твердая жаростойкая смазка для снижения трения [6]. Использование магнетронов для нанесения покрытий бора представляется привлекательной методикой. Однако, при нормальных условиях, чистый бор имеет высокое удельное электрическое сопротивление уровня 10 МОм×см [7]. Такое сопротивление не позволяет обеспечить устойчивое

функционирование магнетронного разряда постоянного тока с распыляемым катодом (мишенью) из бора. Для решения этой проблемы термоизолированная мишень магнетрона из бора предварительно нагревалась в слаботоковом высоковольтном разряде. Так как бор имеет отрицательный температурный коэффициент электрического сопротивления, при нагреве мишени до температуры около 600 °С её сопротивление снижается до уровня 10 Ом×см. Это обеспечивает стабильное зажигание магнетронного разряда с нагретой мишенью из бора. Такой метод был опробован в магнетронном разряде, функционирующем в среде инертных газов [8].

Целью настоящей работы была реализация магнетронного нанесения покрытия бора и последующая его модификация непрерывным электронным пучком в среде азота, исследование структуры и свойства таких покрытий.

Методика нанесения и электронно-пучковой модификации покрытия бора

В качестве объекта исследования были выбраны покрытия бора, нанесенные на поверхность образцов из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Образцы имели прямоугольную форму размером 15×15 мм и толщиной 5 мм. Поверхность образцов, на которую наносилось покрытие, была отполирована до 10 класса чистоты.

Конструкция планарного магнетрона с мишенью из чистого (99,95 ат. %) бора, используемого для нанесения покрытий, имела несколько принципиальных отличий от стандартных устройств. Во-первых, это термическая изоляция мишени диаметром 5 см от электродов магнетрона, осуществляемая прокладками из электропроводящего граффлекса. Во-вторых, поскольку покрытие бора, осаждаемое на аноде магнетрона в процессе напыления, приводило к его электрической изоляции и погасанию разряда [9], стандартный анод магнетрона был дополнен системой из плоских анодных колец, с щелями шириной 2 мм между ними. В щелях формирование покрытия бора происходило с меньшей интенсивностью и это позволило обеспечить стабильное функционирование разряда в течение десятков часов. И, наконец, особенностью анода было наличие анодной полости с равномерно расположенными по её внутреннему диаметру двенадцатью отверстиями, обеспечивающими равномерное распределение потока рабочего газа (аргон особой чистоты - 99,999 %) в область мишени. Это позволяло снизить предельное давление и напряжение горения разряда магнетрона.

Вакуумная камера, в которой осуществлялось нанесение и модификация покрытия, предварительно откачивалась криогенным "безмасляным" насосом НВК-250-3.2 до остаточного давления 10^{-5} Па. Давление аргона в камере при нанесении покрытия поддерживалось регулятором расхода газа РРГ-10 на уровне 0,15 Па. Для электрического питания магнетронного разряда использовался стабилизированный источник Spellman SL6PN300 с регулируемым постоянным током до 50 мА и напряжением до 6 кВ.

Процедура нанесения покрытия была следующей. Сначала зажигался магнетронный разряд с током уровня 3 мА и напряжением горения около 4 кВ, который начинал разогревать мишень из бора. По мере разогрева мишени, её сопротивление снижалось, а ток разряда увеличивался. Приблизительно через 3 мин ток разряда достигал рабочего значения 50 мА, а напряжение горения снижалось до 850 В. После этого, производилось позиционирование образца, закрепленного на подвижном держателе, для нанесения покрытия. Образец располагался в центре на расстоянии 7 см от поверхности мишени магнетрона. Толщина покрытия бора была пропорциональна времени процесса его напыления. В настоящей работе, для удобства сравнения различных характеристик покрытия,

все данные приведены для образцов со временем нанесения покрытия 5 часов.

После нанесения покрытия вакуумная камера заполнялась азотом 99,9 % чистоты до давления 4 Па, поддерживаемого откачкой безмасляным спиральным насосом ISP-500B, и проводилась модификация поверхности нанесенного покрытия непрерывным электронным пучком, генерируемым форвакуумным источником электронов. Ток пучка составлял 40 мА при энергии электронов 5 кэВ. Диаметр фокусного пятна пучка в плоскости образца превышал его размер и составлял 30 мм. Плотность мощности пучка на образец была 25 ± 3 Вт/см². Более подробно принцип функционирования, характеристики и параметры электронного источника представлены в работе [10]. Покрытие обрабатывалось электронным пучком в течение 3 часов. В процессе обработки температура покрытия контролировалась быстродействующим оптическим пирометром Raytek-ММ1МН и составляла около 600 °С.

Морфология и микротвердость покрытия

Толщина покрытия, измеренная микроинтерферометром МИИ-4М, составляла $1,1 \pm 0,1$ мкм. Таким образом, скорость нанесения покрытия бора составляла около 3,5 нм/мин. Это существенно выше, чем скорость нанесения покрытий ВЧ магнетронным распылителем, прибором для распыления диэлектрических материалов [11], которая, по оценкам, при такой же средней мощности разряда составляет менее 1 нм/мин.

Средняя плотность покрытия бора для образца была определена методом взвешивания до и после нанесения покрытия аналитически весами ВЛ-220М с точностью измерения 10 мкг. Плотность образцов после нанесения покрытия составляла около 1,6 г/см³, а после отжига электронным пучком в азоте она увеличивалась до 1,9 г/см³. Это ниже, чем плотность кристаллов бора (2,34 г/см³), но существенно выше, чем средняя плотность мишени магнетрона из бора (1,2 г/см³), которая была изготовлена методом горячего прессования в вакууме порошка бора с размерами частиц (1-10) мкм.

Морфология поверхности покрытий была изучена с использованием сканирующего атомно-силового микроскопа Solver P47 с кантилевером NSG-01. Пример рельефа поверхности покрытия приведен на рис.1. Из анализа рис.1 следует, что на поверхности покрытия присут-

ствуют цепочки пиков характерной шириной около 0,5 мкм (светлые области), а также линейные впадины шириной около 0,3 мкм (темные полосы). Перепад высот от этих впадин до пиков составляет около 65 нм, что на порядок меньше толщины покрытия бора. Шероховатость поверхности покрытия $R_a = 4,9$ нм, что характерно для магнетронного метода. Асимметрия для покрытия положительная ($R_{sk} = 1,2$), что означает преобладание пиков над впадинами.

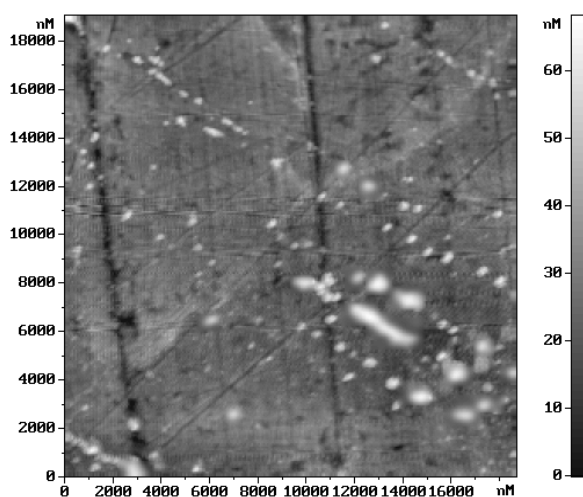


Рис.1. Атомно-силовая микроскопия рельефа поверхности покрытия бора, нанесенного на образцы из нержавеющей стали

Fig.1. Atomic force microscopy of the surface morphology of a boron coating deposited on stainless steel samples

Измерение микротвердости покрытия было проведено с использованием установки NanoTest 600 по методу Оливера-Фарра [12] при усреднении результатов по 10 измерениям. При проведении измерений глубина проникновения индентора в покрытие не превышала 15 % от его толщины, что соответствовало нагрузке на индентор Берковича 2-5 мН. Результаты измерения параметров покрытия были следующими: микротвердость $H = 4,53 \pm 0,08$ ГПа, модуль Юнга $E = 192,2 \pm 8,3$ ГПа. Микротвердость покрытия была существенно ниже, чем, например, у кристаллических аллотропий бора, что может свидетельствовать о преобладании аморфной фазы бора в покрытии.

Состав и структура покрытия

Изображения покрытий бора, полученные с использованием сканирующего электронного

микроскопа Philips SEM 515 до и после обработки покрытия непрерывным электронным пучком (рис.2), показали, что воздействие пучка приводит к фрагментации и частичному разрушению покрытия.

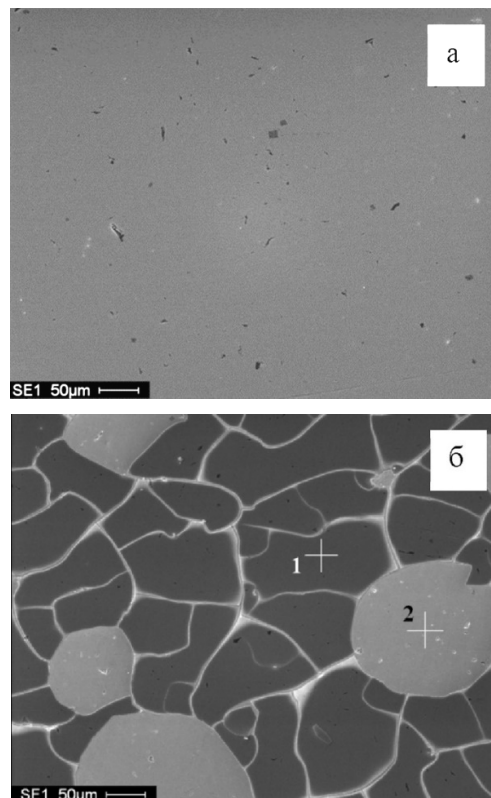


Рис.2. Электронно-микроскопическое изображение покрытия бора до (а) и после (б) облучения электронным пучком

Fig.2. Electron microscopic image of the boron coating before (a) and after (b) the electron beam treatment

Методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что после нанесения покрытия относительное содержание атомов бора в поверхностном слое стали составляет около 89,1 ат. %. Наряду с бором, в покрытии присутствует кислород концентрацией около 7,3 ат. %. По-видимому, использование аргона особой чистоты и криогенная откачка не гарантируют полное удаление из вакуумной системы кислорода, который может присутствовать на поверхностях системы в виде адсорбированных или оксидных пленок. Определение содержания бора в темных и светлых областях покрытия, обработанного пучком, указанных на рис.2б цифрами 1 и 2, показало, что, в первом случае, концентрация атомов бора и кислорода составляют 88,5 и 8,4 ат. %; во втором случае (светлые области) - 70,7 и 10,4 ат. %, соответ-

ственно. Следовательно, полного разрушения покрытия не происходит, а трещины имеют глубину существенно меньше толщины покрытия (см. рис.1).

Рентгенофазовый анализ был проведен с использованием дифрактометра Shimadzu XRD-6000. Съемка осуществлялась монохроматором SM-3121 в медном отфильтрованном излучении Cu-K α 1. Анализ не показал наличия кристаллического бора и фаз на основе бора в стали. Это указывает как на аморфное состояние покрытия, так и на возможное малое количество боридных фаз. Аморфное состояние бора в покрытии подтверждается изменением степени кристалличности системы «покрытие/подложка», а именно, при формировании покрытия бора она составляет 0,67, а после облучения электронным пучком - 0,82, что может указывать на частичную кристаллизацию аморфного бора и формирование наноразмерных борсодержащих включений второй фазы.

Анализ фазового состава покрытия, облученного электронным пучком, был осуществлен методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии с использованием микроскопа JEM-2100F JEOL. Характерное изображение структуры поверхностного слоя образца приведено на рис.3. Отчетливо видно, что в поверхностном слое стали формируется нанокристаллическая (50-110 нм) зернисто-субзернистая структура (рис.3а). На темнопольном изображении (рис.3в) в объеме и на границах кристаллитов γ -фазы наблюдаются наноразмерные (8-10 нм) частицы второй фазы. Анализ микроэлектроннограммы (рис.3б) позволяет заключить, что данные кристаллиты являются боридами хрома Cr₂B. На поверхности образцов обнаруживается тонкий, до 100 нм, слой, содержащий наноразмерные включения гексаборидов хрома CrB₆ (рис.3г).

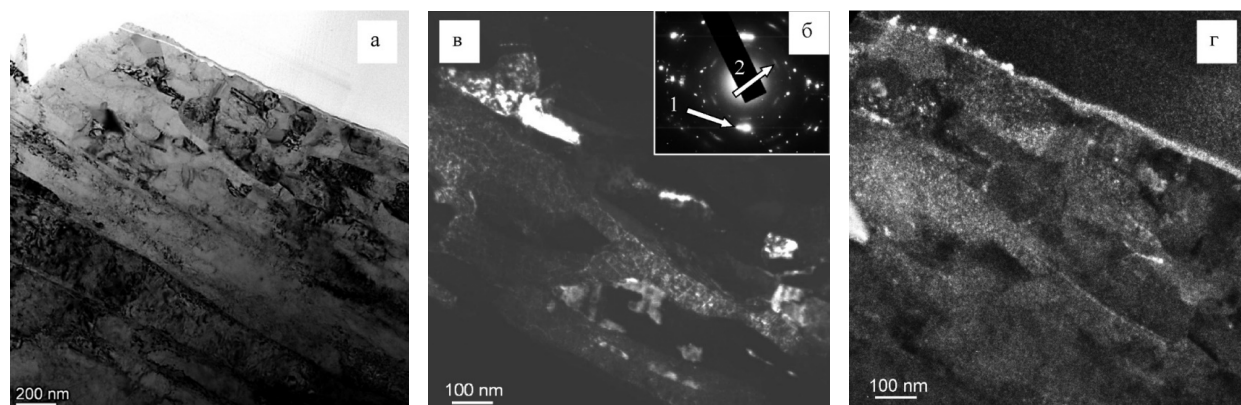


Рис.3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя покрытия бора; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $\langle 111 \rangle \gamma\text{-Fe} + \langle 002 \rangle \text{Cr}_2\text{B}$ и $\langle 201 \rangle \text{CrB}_6 + \langle 002 \rangle \text{CrO}_7$ (рефлексы указаны на (б) стрелками: 1 – для (в), 2 – для (г))

Fig.3. Electron microscopic image of surface structure of the boron coating; a – bright field; b – microelectron diffraction pattern; (c, d) dark fields obtained in the $\langle 111 \rangle \gamma\text{-Fe} + \langle 002 \rangle \text{Cr}_2\text{B}$ and $\langle 201 \rangle \text{CrB}_6 + \langle 002 \rangle \text{CrO}_7$ reflections (the reflections are indicated in (b) by arrows: 1 for (c), 2 for (d))

Методами прямого разрешения кристаллической решетки установлено, что покрытие бора, модифицированное электронным пучком, в основном является аморфным, но содержит в своем объеме включения, имеющие кристаллическую решетку (рис.4, включения указаны стрелками). Размеры включений составляют 3-7 нм.

Несмотря на то, что облучение покрытия бора электронным пучком проводилось в атмосфере азота, фаз нитридов бора в исследовани-

ях зарегистрировано не было. Аморфные покрытия бора могут находить применение в машиностроении, где они могут использоваться в качестве твердых смазок для уменьшения трения [6]. Кроме этого, покрытия бора, обогащенные изотопом ¹⁰B, перспективны при создании детекторов нейтронов, а также для покрытия элементов активной зоны ядерного реактора в качестве выгорающего поглотителя нейтронов с целью снижения реактивности реактора в начале его эксплуатации.

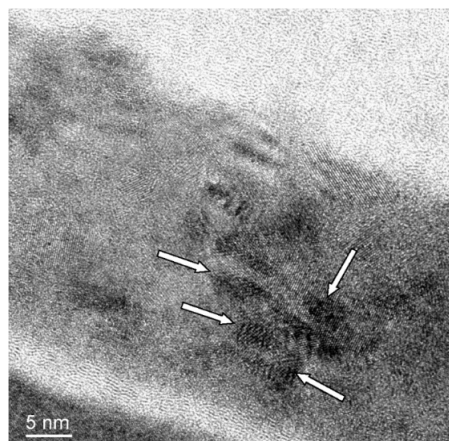


Рис.4. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя системы «покрытие бора/ подложка из 12X18H10T»

Fig.4. Electron microscopic image of the structure of the surface layer of the "boron coating/substrate of 12X18H10T" system

Заключение

Разработана методика нанесения покрытий бора на поверхность с использованием планарного магнетрона с мишенью из чистого кристаллического бора. Особенностью устройства являлась термоизоляция мишени от электродов магнетрона и нагрев ее до состояния проводимости в слаботочной высоковольтной фазе разряда. Скорость нанесения покрытия бора при мощности магнетронного разряда уровня 40 Вт составляла около 3,5 нм/мин, что, при указанной средней мощности, существенно выше аналогичной величины ВЧ магнетрона, используемого для нанесения покрытий из диэлектрических материалов. Покрытие было модифицировано электронным пучком в среде азота с энергией электронов 5 кэВ и плотностью тока пучка 5 мА/см².

Проведены исследования параметров таких покрытий толщиной $1,1 \pm 0,1$ мкм нанесенных на нержавеющую сталь 12X18H10T. Найдено, что воздействие электронного пучка приводит к увеличению плотности покрытия с 1,6 до 1,9 г/см³. Показано, что шероховатость покрытия 4,9 нм. Микротвердость покрытия $4,53 \pm 0,08$ ГПа, что свидетельствует о преобладании в нем аморфной фазы. Установлено, что облучение покрытия электронным пучком приводит к появлению трещин и сколов. На неразрушенных участках концентрация бора в покрытии была 88,5 ат. %, на участках сколов на 25 % ниже. Методом рентгенофазового анализа подтверждено преобладание аморфного состояния бора в покрытии; методом прямого разрешения кристаллической структуры выяв-

лено присутствие в объеме покрытия кристаллических включений размерами 3-7 нм. В приповерхностном слое подложки выявлены наноразмерные частицы боридов и гексаборидов хрома.

Список литературы

1. Baptista A., Silva F.J.G., Porteiro J., Míguez J.L., Pinto G., Fernandes L. On the physical vapour deposition (PVD): evolution of magnetron sputtering processes for industrial applications // *Procedia Manufacturing*. 2018. V. 17. P. 746–757.
2. Hovsepian P.Eh., Lewis D.B., Munz W.-D. Recent progress in large scale manufacturing of multilayer/superlattice hard coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2000. V. 133–134. P. 166–175.
3. Лыгденев Б.Д., Гармаева И.А., Попова Н.А., Козлов Э.В., Гурьев А.М., Иванов С.Г. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 20Л, 45, 55 И 5ХНВ // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2012. Т. 9, № 4–2. С. 681–689.
4. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Лыгденев Б.Д., Земляков С.А., Долгоров А.А. Структура и свойства упрочненных бором и бором совместно с титаном поверхности штамповых сталей 5ХНВ И 5Х2НМВФ // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2010. Т. 7, № 1. С. 27–31.
5. Ипатов А.Г., Харанжевский Е.В. Триботехнические свойства сверхтвердых функциональных покрытий на основе карбида и нитрида бора // *Трение и износ*. 2019. Т. 40, № 6. С. 776–782.
6. Greco A., Mistry K., Sista V., Eryilmaz O., Erdemir A. Friction and wear behavior of boron based surface treatment and nano-particle lubricant additives for wind turbine gearbox applications // *Wear*. 2011. V. 271, N 9–10. P. 1754–1760.
7. Greiner E.S., Gutowski J.A. Electrical resistivity of boron // *Journal of Applied Physics*. 1957. V. 28, N 11. P. 1364–1365.
8. Gushenets V.I., Oks E.M., Savkin K.P., Vizir A.V., Yushkov G.Yu., Hershcovitch A., Kulevoy T.V. Boron ion beam generation using a self-sputtering planar magnetron // *Review of Scientific Instruments*. 2010. V. 81, N 2. P. 02B303.
9. Belkind A., Jansen F. Anode effects in magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. 1998. V. 99, N 1–2. P. 52–59.
10. Yushkov Y.G., Oks E.M., Tyunkov A.V., Zolotukhin D.B. Alumina coating deposition by

electron-beam evaporation of ceramic using a forevacuum plasma-cathode electron source // *Ceramics International*. 2019. V. 45, N 8. P. 9782–9787.

11. Pascual E., Martínez E., Esteve J., Lousa A. Boron carbide thin films deposited by tuned-substrate RF magnetron sputtering // *Diamond and Related Materials*. 1999. V. 8, N 2–5. P. 402–405.

12. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology // *Journal of Materials Research*. 2004. V. 19, N 1. P. 3–20.

Информация об авторах

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

Г. Ю. Юшков – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

References

1. Baptista, A., Silva, F. J. G., Porteiro, J., Míguez, J. L., Pinto, G. & Fernandes, L. (2018). On the physical vapour deposition (PVD): evolution of magnetron sputtering processes for industrial applications. *Procedia Manufacturing*, (17), 746–757.

2. Hovsepian, P. Eh., Lewis, D. B. & Munz, W.- D. (2000). Recent progress in large scale manufacturing of multilayer/superlattice hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, (133–134), 166–175.

3. Ligdenov, B. D., Garmaeva, I. A., Popova, N. A., Kozlov, E. V., Guriev, A. M. & Ivanov, S. G. (2012). Research of phase structure and defective condition gradient of structures boronizing steels 20L, 45, 55 and 5HNV. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4–2(9), 681–689. (In Russ.).

4. Guriev, A. M., Ivanov, S. G., Guriev, M. A., Ivanov, A. G., Ligdenov, B. D., Zemlyakov, S. A. & Dolgorov A. A. (2010). Structure and properties of surfaces of 5HNV and 5H2NMVF stamp steels hardened with boron and boron together with

titanium. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(7), 27–31. (In Russ.).

5. Ipatov, A. G. & Kharanzhevsky, E. V. (2019). The tribological properties of super-hard and functional coatings based on carbide and boron nitride. *Journal of Friction and Wear*, 6(40), 588–592.

6. Greco, A., Mistry, K., Sista, V., Eryilmaz, O. & Erdemir, A. (2011). Friction and wear behavior of boron based surface treatment and nanoparticle lubricant additives for wind turbine gearbox applications. *Wear*, 9–10(271), 1754–1760.

7. Greiner, E. S. & Gutowski, J. A. (1957). Electrical resistivity of boron. *Journal of Applied Physics*, 11(28), 1364–1365.

8. Gushenets, V. I., Oks, E. M., Savkin, K. P., Vizir, A. V., Yushkov, G. Yu., Hershcovitch, A. & Kulevoy, T. V. (2010). Boron ion beam generation using a self-sputtering planar magnetron. *Review of Scientific Instruments*, 2(81), 02B303.

9. Belkind, A. & Jansen, F. (1998). Anode effects in magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 1–2(99), 52–59.

10. Yushkov, Y. G., Oks, E. M., Tyunkov, A. V. & Zolotukhin, D. B. (2019). Alumina coating deposition by electron-beam evaporation of ceramic using a forevacuum plasma-cathode electron source. *Ceramics International*, 8(45), 9782–9787.

11. Pascual, E., Martinez, E., Esteve, J. & Lousa, A. (1999). Boron carbide thin films deposited by tuned-substrate RF magnetron sputtering. *Diamond and Related Materials*, 2–5(8), 402–405.

12. Oliver, W. C. & Pharr, G. M. (2004). Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 1(19), 3–20.

Information about the authors

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

G. Yu. Yushkov – Doctor of Technical Sciences, Chief Scientist, 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 11.11.2022; одобрена после рецензирования 22.11.2022; принята к публикации 29.11.2022.

The article was received by the editorial board on 11 Nov. 22; approved after reviewing 22 Nov. 22; accepted for publication 29 Nov. 22.