

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 621.793.182

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.007

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКРЫТИЙ БОРА, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ
МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ В АРГОНЕ И АЗОТЕ****Юрий Федорович Иванов^{1†}, Георгий Юрьевич Юшков²**^{1,2} Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия¹ yufi55@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>² gyushkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7615-6058>

Аннотация. Представлен сравнительный анализ свойств покрытий бора на поверхности нержавеющей стали, нанесенных в среде аргона и азота с использованием планарного магнетрона с термоизолированной нагреваемой в разряде мишенью из чистого кристаллического бора. Измерены скорости нанесения покрытий, которые при постоянной мощности разряда уровня 40 Вт при использовании в качестве рабочих газов аргона и азота составляли около 4 и 4,7 нм/мин, соответственно. Методом сканирующей электронной микроскопии исследован рельеф поверхности покрытия. Показано, что, несмотря на различие характера рельефа покрытий, формирующихся в аргоне и азоте, морфологические свойства поверхностей близки. Результаты, полученные методами рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, свидетельствуют о преобладании аморфной фазы бора в покрытиях, нанесенных в этих газах. На границе раздела покрытия и подложки выявлено формирование частиц боридов железа и кристаллического бора с размерами от 3 нм до 4,5 нм, образующихся как в среде аргона, так и азота.

Ключевые слова: магнетронное нанесение покрытий, пленки бора, фазовый состав, свойства покрытий.

Благодарности: Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-29-00381, <https://rscf.ru/project/22-29-00381/>.

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Юшков Г.Ю. Сравнительный анализ покрытий бора, нанесенных методом магнетронного напыления в аргоне и азоте // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 4. С. 484–490. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.007.

Original article

**COMPARATIVE ANALYSIS OF BORON COATINGS DEPOSITED BY MAGNETRON
SPUTTERING IN ARGON AND NITROGEN****Yurii F. Ivanov^{1†}, Georgy Yu. Yushkov²**^{1,2} Institute of High Current Electronics SB RAS, Academicheskii Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia¹ yufi55@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>² gyushkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7615-6058>

Abstract. A comparative analysis of the properties of boron coatings on the surface of stainless steel deposited in an argon and nitrogen using a planar magnetron with a thermally insulated discharge-heated target made of pure crystalline boron is presented. Coating deposition rates were measured, which, at discharge power of 40 W using argon and nitrogen as working gases, were about 4 and 4.7 nm/min, respectively. The surface relief of the coating was studied by scanning electron microscopy. It is shown that, despite the difference in the nature of the relief of coatings formed in argon and nitrogen, the morphological properties of the surfaces are close. The results obtained by X-ray phase analysis and transmission electron diffraction microscopy indicate the predominance of the amorphous boron phase in coatings deposited in these gases. At the interface between the coating and the substrate, the formation of particles of iron borides and crystalline boron with sizes from 3 nm to 4.5 nm, formed both in argon and nitrogen, was revealed.

Keywords: magnetron coating, boron films, phase composition, coating properties.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation by grant No. 22-29-00381, <https://rscf.ru/project/22-29-00381/>.

For citation: Ivanov, Yu. F. & Yushkov, G. Yu. (2023). Comparative analysis of boron coatings deposited by magnetron sputtering in argon and nitrogen. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(4), 484–490. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.007.

Введение

Создание слоев и покрытий бора на различных поверхностях представляет значительный практический интерес. Метод борирования, в котором бориды металлов образуются за счет диффузного насыщения бором приповерхностных слоев деталей из сталей и сплавов, широко применяется в промышленности для улучшения их функциональных свойств [1]. Нанесение покрытий бора на поверхности деталей также имеет перспективу для решения ряда практических задач. Так, покрытия из кристаллического бора увеличивают твердость, износостойкость и коррозионную стойкость поверхности [2, 3], а покрытия из аморфного бора могут использоваться как твердая жаростойкая смазка [4]. Использование магнетронных систем напыления [5] представляется привлекательным методом для нанесения покрытий бора на широкую номенклатуру поверхностей.

Принципиальным моментом при использовании магнетронной системы напыления является наличие достаточной электропроводности материала распыляемой мишени (катода разряда). В противном случае, падение напряжения на сопротивлении мишени не позволяет реализовать функционирование разряда или ограничивает существование этого разряда слаботочной формой, при которой производительность нанесения покрытия невелика. Поскольку при нормальных условиях электрическое сопротивление бора около 10 МОм·см [6], использование мишени из бора для нанесения его покрытий в стандартных магнетронных напылительных системах затруднено.

Вместе с тем, бор, как все полупроводники, имеет отрицательный температурный коэффициент электрического сопротивления и его нагрев приводит к увеличению его электрической проводимости. Данный эффект был использован для реализации функционирования магнетрона с мишенью из чистого кристаллического бора в атмосфере инертных газов [7].

Целью настоящей работы было нанесение покрытий бора методом магнетронного распыления в среде аргона и азота, и проведение исследований, направленных на сравнение структуры и свойств этих покрытий.

Методика нанесения покрытия бора

Для нанесения покрытий использовался планарный магнетрон с мишенью диаметром 51 мм, выполненной из чистого (99,95 ат. %) кристаллического бора. Основные отличия этого магнетрона от аналогичных стандартных устройств состояли в следующем. Мишень из бора была закреплена на водоохлаждаемой магнитной системе с использованием кольцевых прокладок из граффлекса толщиной 1 мм. Прокладки из граффлекса, электропроводящего материала с анизотропными теплопроводными свойствами, обеспечивали термоизоляцию нагреваемой в разряде мишени и приложение к ней катодного потенциала. При нагреве мишени до температуры около 400 °С удельное электрическое сопротивление бора снижалось до уровня 5 Ом·см, что делало возможным стабильное зажигание магнетронного разряда и нанесение покрытий на поверхность образцов.

Поскольку покрытие бора обладает достаточной электропроводностью только при повышенной температуре, его нанесение на относительно холодный анод магнетрона приводило к изоляции его поверхности и нестабильному функционированию разряда за счет известного эффекта "исчезающего анода" [8]. Поэтому, стандартный анод магнетрона был заменен на анод, выполненный из трех плоских колец из нержавеющей стали толщиной 2 мм с щелями между ними шириной 3 мм. Осаждение бора на поверхность колец в щелях происходило с меньшей интенсивностью и это позволяло обеспечить стабильное функционирование магнетронного разряда в течение около 70 часов. После указанного промежутка времени, в случае появления нестабильности разряда, производилась очистка поверхности колец от по-

крытия бора и система была готова функционировать снова.

Другой особенностью конструкции анода магнетрона было наличие газораспределяющей анодной полости с расположенными по её внутреннему диаметру отверстиями. Это обеспечивало равномерное распределение потока рабочего газа в область рабочей поверхности мишени и обеспечивало снижение напряжения горения и предельного давления разряда магнетрона. Более детально конструкция и принцип функционирования магнетрона представлены в работах [7, 9].

Откачка вакуумной камеры перед нанесением покрытий бора осуществлялась криогенным "безмасляным" насосом НВК-250-3.2 до остаточного давления $3 \cdot 10^{-5}$ Па. При нанесении покрытия подавался поток рабочего газа - аргона или азота особой чистоты (объемная доля - 99,999 %) и давление в области разрядной системы магнетрона повышалось до 0,2 Па. Ток магнетронного разряда обеспечивался стабилизированным источником Spellman SL6PN300 с регулируемым постоянным напряжением до 6 кВ.

Покрытия бора наносились на поверхность образцов из нержавеющей стали марки 12X18H10T. Образцы были прямоугольной формы с размером 15×15 мм и толщиной 5 мм, и отполированы до 11 класса чистоты. Процедура зажигания разряда была аналогична представленной в работе [9]. При нанесении покрытий образец располагался на расстоянии 6 см от поверхности мишени магнетрона. Толщина покрытия бора была пропорциональна времени процесса его нанесения и току разряда. Для удобства сравнения различных характеристик покрытий, все данные приведены для образцов со временем нанесения покрытия в атмосферах аргона и азота в течение 5 часов при постоянном токе магнетронного разряда 50 мА.

Морфология и микротвердость покрытия

Толщина покрытия бора, измеренная микроинтерферометром МИИ-4М, в случае использования в качестве рабочего газа аргона, составляла $1,2 \pm 0,1$ мкм, а в случае азота - $1,4 \pm 0,1$ мкм. Таким образом, скорости нанесения покрытий бора при использовании аргона и азота были близки и составляли около 4 и 4,7 нм/мин, соответственно. Отметим, что полученные скорости нанесения покрытий бора были выше, чем скорости нанесения покрытий

ВЧ магнетронным распылителем непроводящих материалов [10], которые, при используемой в эксперименте средней мощности разряда уровня 40 Вт, составляли не более 1 нм/мин.

Средняя плотность покрытия бора была определена по измеренной толщине и приращению массы образца, определенной с помощью аналитических весов ВЛ-220М с точностью ± 10 мкг. В случае образцов, нанесенных в атмосфере аргона, она составила $1,6$ г/см³, азота - $1,3$ г/см³. Полученные значения плотности покрытий были ниже, чем, например, плотности β -ромбоэдрической аллотропии кристаллического бора ($2,34$ г/см³) или гексагонального нитрида бора ($2,1$ г/см³), но выше, чем средняя плотность мишени магнетрона ($1,2$ г/см³), изготовленной методом горячего прессования в вакууме кристаллов бора с размерами от 1 до 10 мкм.

Рельеф поверхности покрытий был определен с использованием сканирующего атомно-силового микроскопа Solver P47 с кантилевером NSG-01. Примеры рельефа поверхностей покрытий бора, полученных в атмосферах аргона и азота, представлены на рис.1. Из анализа полученных данных следует, что на поверхности покрытия, нанесенного в аргоне, присутствуют пики с характерным размером основания (20-100) нм, а в случае азота преобладает волнообразный рельеф с вершинами шириной около (50-300) нм и впадинами между ними около (30-100) нм.

Несмотря на различие рельефа, перепад неоднородностей покрытий по их высоте практически одинаков: около 22 нм в случае аргона и около 24 нм в случае азота, что приблизительно в 50 раз меньше толщины покрытия бора для этих случаев. Шероховатость поверхности покрытий R_a , нанесенных как в аргоне, так и азоте, также одинакова и составляет около 2 нм, что, в общем-то, типично для покрытий толщиной уровня 1 мкм, полученных магнетронным методом. Асимметрия для покрытия бора в аргоне положительная ($R_{sk} = 0,1$), что означает преобладание пиков над впадинами, а в случае азота наоборот, отрицательная ($R_{sk} = -0,1$).

Измерение микротвердости покрытия было проведено с использованием установки NanoTest 600 по методу Оливера-Фарра [11] при усреднении результатов по 10 измерениям. Результаты измерения параметров покрытия были следующими: в случае аргона микротвердость поверхности покрытия составляла $H = 6,5 \pm 0,1$ ГПа, модуль Юнга $E = 72 \pm 2$ ГПа; в

случае азота $H = 2,5 \pm 0,1$ ГПа, $E = 64 \pm 2$ ГПа. Микротвердость покрытий была существенно ниже, чем, например, у кристаллических аллотропий бора, что может свидетельствовать о преобладании аморфной фазы бора в формируемом покрытии.

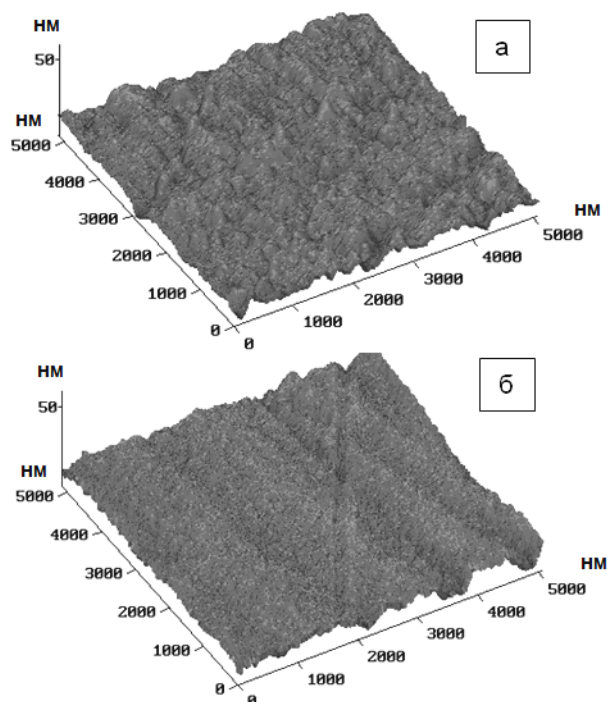


Рис.1. Атомно-силовая микроскопия рельефа поверхности покрытия бора, нанесенного на образцы из нержавеющей стали в атмосфере аргона (а) и азота (б)

Fig.1. Atomic force microscopy of the surface morphology of a boron coating deposited on stainless steel samples in argon (a) and nitrogen (b)

Состав и структура покрытия

Исследования структуры покрытий бора, сформированных в среде аргона или азота, выполненные методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Philips SEM 515), не выявили значительных различий. В обоих случаях на электронно-микроскопических изображениях выявляется крапчатый контраст размерами (200-250) нм. Электронно-микроскопическое изображение покрытия бора, сформированного в среде аргона, представлено, в качестве примера, на рис.2. Методами микро-рентгеноспектрального анализа показано, что наряду с атомами бора (бора и азота, в случае атмосферы азота) в покрытии присутствуют атомы кислорода (табл.).

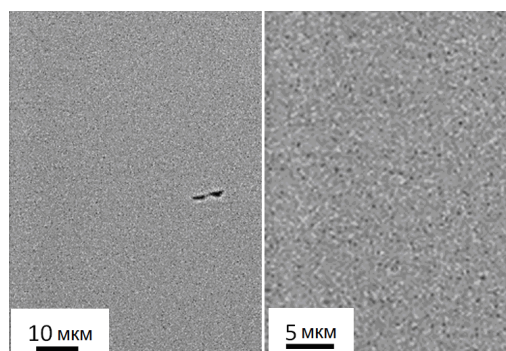


Рис.2. Электронно-микроскопическое изображение покрытия бора, сформированного в среде аргона

Fig.2. Electron microscopic image of the boron coating formed in an argon

Таблица. Результаты микро-рентгеноспектрального анализа системы «покрытие (бор)/(сталь 12X18H10T) подложка»

Table. Results of X-ray microspectral analysis of the «coating (boron)/(steel 12Kh18N10T) substrate» system

Химический элемент	Концентрация, ат.%	
	B+Ar	B+N ₂
B	89,29	66,70
N	0,00	15,72
O	7,26	11,15
Cr	0,72	1,33
Fe	2,45	4,58
Ni	0,28	0,52

Методами рентгенофазового анализа (дифрактометр Shimadzu XRD-6000; съемка осуществлялась с монохроматором CM-3121 в медном отфильтрованном излучении Cu-K α 1) кристаллический бор и фазы на его основе не обнаружены, что может свидетельствовать как об аморфном состоянии бора, так и о малом количестве фаз на основе бора. На аморфное состояние системы «покрытие/подложка» указывает низкий уровень кристалличности исследуемого материала: степень кристалличности покрытия бора, сформированного в среде аргона 67 %, в среде азота – 56 %. Следует отметить, что формирование покрытия в среде азота сопровождается азотированием поверхностного слоя стали с образованием нитридов железа состава Fe₃N.

Детальное исследование структуры и фазового состава покрытия проводили методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-2100F JEOL). Установлено, что независимо от среды формирова-

ния (аргон или азот), покрытие бора является аморфно-кристаллическим, о чем свидетельствуют результаты, полученные методом прямого разрешения кристаллической решетки (рис.3).

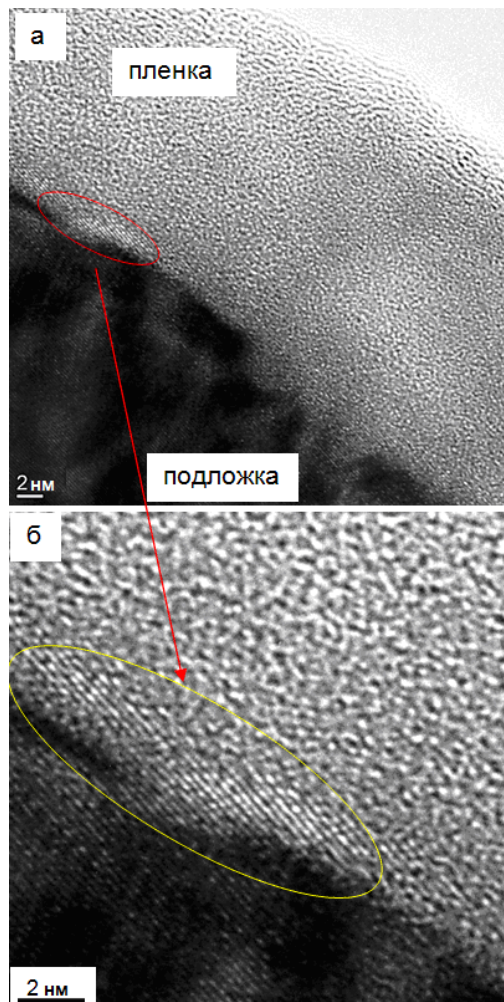


Рис.3. Структура системы «пленка/подложка», формирующаяся при осаждении на сталь бора в среде аргона. Овалом обозначена область покрытия, имеющая кристаллическую решетку

Fig.3. The structure of the «film/substrate» system formed during the deposition of boron on steel in an argon. The oval indicates the area of the coating, which has a crystal lattice

Фазовый состав системы «покрытие/подложка» изучали методами темнопольного анализа и индицирования соответствующих микроэлектроннограмм. В покрытии бора, сформированном как в среде аргона (рис.4), так и в среде азота (рис.5), выявлены частицы боридов железа состава FeB и Fe₂B, а также кристаллического бора. Размеры частиц изменяются в пределах (3-4,5) нм.

Следует обратить внимание на то, что формирование на поверхности стали покрытия бора, независимо от газовой среды (аргон или азот), сопровождается деформированием подложки с формированием в тонком (≈ 100 нм) поверхностном слое нанокристаллической (35-60 нм) зеренной структуры (рис.3а, рис.4а).

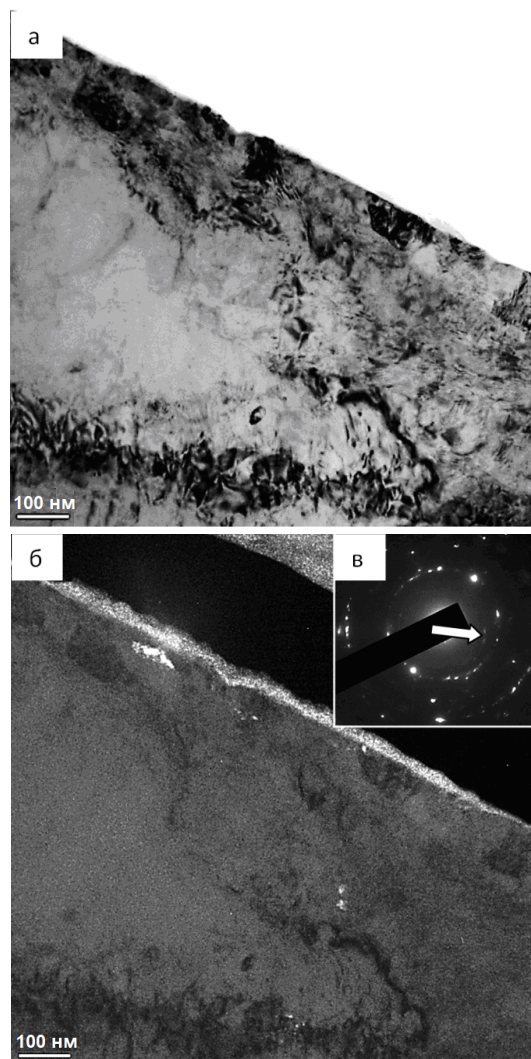


Рис.4. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя системы «покрытие/подложка», сформированного в среде аргона; а – светлое поле; б – темное поле, полученное в близко расположенных рефлексах $\langle 020 \rangle$ FeB + $\langle 321 \rangle$ B; в – микроэлектроннограмма (рефлексы, в которых получено темное поле, указаны на (в) стрелкой)

Fig.4. Electron microscopic image of the structure of the surface layer of the «coating/substrate» system formed in an argon; a – bright field; b – dark field obtained in closely spaced reflections $\langle 020 \rangle$ FeB + $\langle 321 \rangle$ B; (c) microelectron diffraction pattern (reflections in which a dark field was obtained are indicated by an arrow in (c))

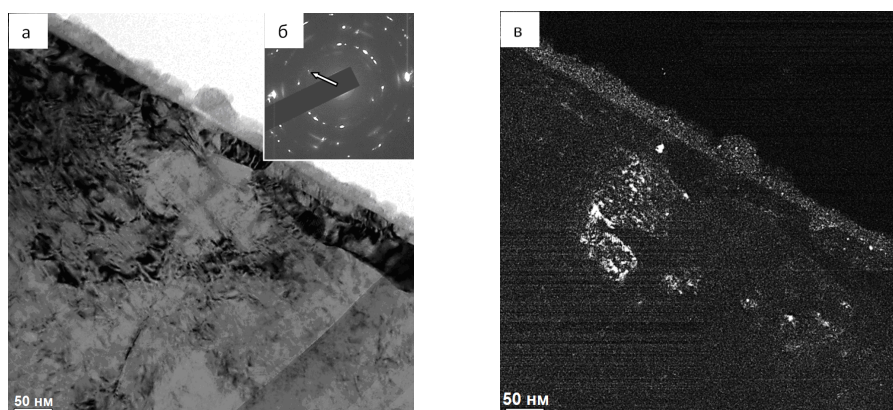


Рис.5. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя системы «покрытие/подложка», сформированного в среде азота; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в – темное поле, полученное в рефлексах $\langle 100 \rangle \text{Fe}_3\text{N} + \langle 101 \rangle \text{FeB}$

Fig.5. Electron microscopic image of the structure of the surface layer of the «coating/substrate» system formed in a nitrogen environment; a – bright field; b – microelectron diffraction pattern; c – dark field obtained in $\langle 100 \rangle \text{Fe}_3\text{N} + \langle 101 \rangle \text{FeB}$ reflections

Заключение

Сравнительный анализ структуры и свойств покрытий бора на поверхности нержавеющей стали марки 12X18H10T, нанесенных в среде аргона и азота с использованием планарного магнетрона с термоизолированной, нагреваемой в разряде, мишенью из чистого кристаллического бора, показал следующее. Скорости нанесения покрытий при одинаковой мощности магнетронного разряда уровня 40 Вт, при использовании в качестве рабочих газов аргона и азота, достаточно близки и составили около 4 и 4,7 нм/мин, соответственно. Плотность покрытий толщиной около 1 мкм в атмосфере аргона была 1,6 г/см³, а азота - 1,3 г/см³. С использованием метода сканирующей электронной микроскопии поверхности, показано, что, несмотря на различие характера рельефа покрытий, формирующихся в аргоне и в азоте, шероховатость поверхности приблизительно одинаковая. Относительно невысокие значения микротвердости покрытий свидетельствуют о преобладании аморфной фазы в нем, как в случае аргона, так и азота. Это было прямо подтверждено методами рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Исследование фазового состава системы «покрытие/подложка» показало, что как в случае аргона, так в случае азота на границе раздела формируются частицы боридов железа состава Fe₂B и Fe₃B, а также кристаллического бора, размеры которых изменяются в пределах (3-4,5) нм. Таким образом, близкие характеристики покрытий, полученных в атмосфере этих газов, связаны с преимущественным формированием аморфной структуры бора в покрытиях, а кристаллическая фаза

формируется в том и другом случае только на границе контакта покрытия и подложки. Несмотря на использование при нанесении покрытий "безмаслянной" вакуумной откачки на основе криогенного насоса и рабочих газов особой чистоты, в покрытиях бора присутствовал кислород. По-видимому, это связано с адсорбцией кислорода со стенок вакуумной камеры за счет плазмы разряда, а появление слоев кислорода на стенках – с его десорбцией на них при экспонировании камеры в атмосфере.

Список литературы

1. Лыгденов 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.
2. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Лыгденов 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

6. Greiner E.S., Gutowski J.A. Electrical resistivity of boron // *Journal of Applied Physics*. 1957. V. 28, N 11. P. 1364–1365.

7. 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.

8. Belkind A., Jansen F. Anode effects in magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. 1998. V. 99, N 1–2. P. 52–59.

9. 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.

10. 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.

11. 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, доцент, главный научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

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

References

1. 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))*, 9(4–2), 681–689. (In Russ.).

2. 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.

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

Статья поступила в редакцию 20.06.2023; одобрена после рецензирования 18.07.2023; принята к публикации 31.07.2023.

The article was received by the editorial board on 20 June 23; approved after reviewing 18 July 23; accepted for publication 31 July 23.

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

3. 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*, 40(6), 588–592.

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

5. 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.

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

7. 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*, 81(2), 02B303.

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

9. Иванов, Ю. Ф. & Юшков, Г. Ю. (2022). Structure and properties of boron coating deposited by magnetron sputtering and modified by electron beam. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 19(4), 539–545. (In Russ.).

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

11. 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*, 19(1), 3–20.

Information about the authors

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

G. Yu. Yushkov – Doctor of Technical Sciences, Chief Scientist, Institute of High Current Electronics SB RAS.