

**GAS-METALLIC BEAM-PLASMA FORMATIONS
FOR DEPOSITION OF STRENGTHENING COATINGS**

Mikhail Viktorovich Savchuk^{1a}, *Vladimir Viktorovich Denisov*¹,
*Sergey Sergeevich Kovalskiy*¹, *Andrey Andreevich Leonov*¹,
*Vladimir Egorovich Prokopiev*¹, *Alexander Nikolaevich Shmakov*²

¹ Institute of High Current Electronics, Akademicheskyy pr. 2/3, 634055, Tomsk, Russia

² Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Academician Lavrentiev pr. 11, 630090, Novosibirsk, Russia

^a mixail96@bk.ru

ABSTRACT

In the modern world, a vacuum arc is most often used to depositing coatings in plasma technologies. This method is called vacuum-arc deposition and it is the most attractive of the variety of coating options. Two discharge schemes are used in work. In the first scheme two vacuum-arc evaporators were used to generate metal plasma, as well as a PINK to generate gas plasma. The anode for the plasma sources was the inner walls of a vacuum chamber. The gas plasma source formed a plasma with a concentration gradient directed towards the walls of the chamber, while the maximum concentration area was located near the outlet of the source. In the second discharge scheme a gas-metal beam-plasma formation was formed in the hollow cathode of non-self-sustained glow discharge. In both discharge circuits a (Zn+Ti-B-Si-Ni)N coating was deposited. According to the results of measurements, the hardness values were 41 GPa during deposition in the traditional scheme and 47.8 GPa during deposition in the scheme in a gas-metal beam-plasma formation.

KEYWORDS

Vacuum-arc discharge; depositing coatings; glow discharge; beam-plasma formation.

**ГАЗО-МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ
ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ**

Михаил Викторович Савчук^{1a}, *Владимир Викторович Денисов*¹,
*Сергей Сергеевич Ковальский*¹, *Андрей Андреевич Леонов*¹,
*Владимир Егорович Прокопьев*¹, *Александр Николаевич Шмаков*²

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

² Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11

^a mixail96@bk.ru

АННОТАЦИЯ

Вакуумно-дуговой метод напыления покрытий – один из наиболее распространенных методов нанесения нитридных тонкопленочных покрытий. В данной работе методом эмиссионной спектроскопии проводилось исследование состава газо-металлического пучково-плазменного образования, сформированного в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда при одновременной работе вакуумно-дуговых испарителей. Также приводятся результаты напыления в двух разрядных схемах: классической схеме вакуумно-дугового напыления с плазменным ассистированием и полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда с внешней инъекцией электронов. В обеих схемах в качестве генераторов металлической плазмы используются два электродуговых испарителя. В качестве материалов катодов используются алюминиевый и титановый катоды. В работе проведено сравнение результатов напыления композиционного покрытия системы $(ZrTiBSiNi)N$. Согласно результатам измерений, значения твердости составили 41 ГПа при осаждении в классической разрядной схеме и 47,8 ГПа при осаждении в газо-металлическом пучково-плазменном формовании, сформированном в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Вакуумно-дуговой разряд; напыление покрытия; тлеющий разряд; пучково-плазменное образование.

Введение

Непрерывное развитие современных отраслей промышленности и технологий привело к увеличению спроса на прочные, легкие и экологически чистые материалы для повышения производительности и расширения сферы их применения [1, 2]. Среди многочисленных методов, используемых для нанесения высокоэффективных покрытий на подложки, вакуумно-дуговой метод [3–5] доказал свою эффективность во множестве областей, включая аэрокосмическую, автомобильную, медицинскую и электронную [6–11]. Несмотря на такие преимущества вакуумно-дугового плазменно-ассистированного метода напыления покрытий, как высокую адгезию и однородность напыляемого покрытия, широкий спектр материалов покрытия, высокую скорость напыления покрытий и возможность контролировать параметры покрытия, данный метод имеет существенный недостаток, выражающийся в сложности синтеза однородной плазмы в больших вакуумных объемах. Решение

задачи формирования плазмы с низкой степенью неоднородности с независимой регулировкой основных рабочих параметров возможно путем генерации плазмы в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом [12–16]. Плазменное образование, синтезируемое в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда, по определяющему влиянию на ее свойства пучка инжектируемых электронов может быть отнесено к пучково-плазменным образованиям (ППО) [17]. Для формирования пучково-плазменного образования необходимо выполнение двух условий. Во-первых, наличие разрядной системы, обеспечивающей стабильное горение разряда в требуемом диапазоне давлений и смеси рабочих газов. Во-вторых, дополнительная инъекция пучка энергетических, в частности заряженных, частиц в электро-разрядную систему. Благодаря инъекции энергетических частиц в разрядный промежуток изменяются характеристики разряда, облегчая горение разряда, что, в свою очередь, влияет на распределение и состав формируемого плазменного образования.

Основная цель данной работы состояла в исследовании закономерностей влияния условий генерации пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде на состав газовой-металлического плазменного образования. Также в работе проводилось исследование характеристик покрытия, полученных путем напыления в классической системе вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления и в системе генерации газо-металлических пучково-плазменных образований.

1. Методика исследований

В данной работе для определения динамики содержания ионов алюминия и титана в аргоновой и азотной плазме при изменении тока вакуумно-дугового разряда использовался метод эмиссионной спектроскопии с использованием спектрометра HR4000 фирмы Ocean Optics с диапазоном измеряемых длин волн (250–350) нм и спектральным разрешением 0,5 нм. Съемка проводилась с одинаковым временем экспозиции и усреднением по 4 измерениям. Это обеспечивало достаточную интенсивность эмиссионных спектров для анализа содержания ионов алюминия и титана в плазменной среде. Для оценки относительного содержания однозарядных ионов Ti и Al в плазме использо-

вались переходы на длинах волн, представленные в табл. 1.

Основная задача исследования состояла в определении влияния величины тока разряда вакуумно-дугового испарителя на эмиссионные спектры газо-металлического пучково-плазменного образования, формируемого в несамостоятельном тлеющем разряде. Генерация пучково-плазменного образования производилась в аргоне особой чистоты при давлении 0,6 Па и в азоте особой чистоты при давлении 0,5 Па. Ток вакуумно-дугового испарителя с алюминиевым катодом изменялся в диапазоне от 60 до 90 А с шагом в 10 А. Ток вакуумно-дугового испарителя с титановым катодом изменялся в диапазоне от 80 до 110 А с шагом в 10 А.

Для более глубокого изучения влияния генерации газо-металлических пучково-плазменных образований на характеристики напыляемых покрытий, были проведены процессы осаждения покрытий плазменно-ассистированным методом на установке генерации пучково-плазменных образований «ППУ-1». На рис. 1, б представлена традиционная разрядная схема для вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления покрытий. Разрядная схема, в которой формировались газо-металлические пучково-плазменные образования, представлена на рис. 1, а.

Таблица 1. Длины волн, использованные при оценке числа частиц и соответствующие им переходы

Table 1. Wavelengths used in estimating the number of particles and their corresponding transitions

Частица / Particle	Длина волны / Wavelength	Энергетический переход / Energy transition
Ti ⁺	307,5 nm	3d ² (³ F)4p → 3d ² (³ F)4s
Ti ⁺	308,8 nm	3d ² (³ F)4p → 3d ² (³ F)4s
Ti ⁺	334,8 nm	3d ² (³ F)4p → 3d ³
Ti ⁺	336,1 nm	3d ² (³ F)4p → 3d ² (³ F)4s
Ti ⁺	337,3 nm	3d ² (³ F)4p → 3d ² (³ F)4s
Ti ⁺	338,37 nm	3d ² (³ F)4p → 3d ² (³ F)4s
Al ⁺	266,9 nm	3s3p → 2p ⁶ 3s ²

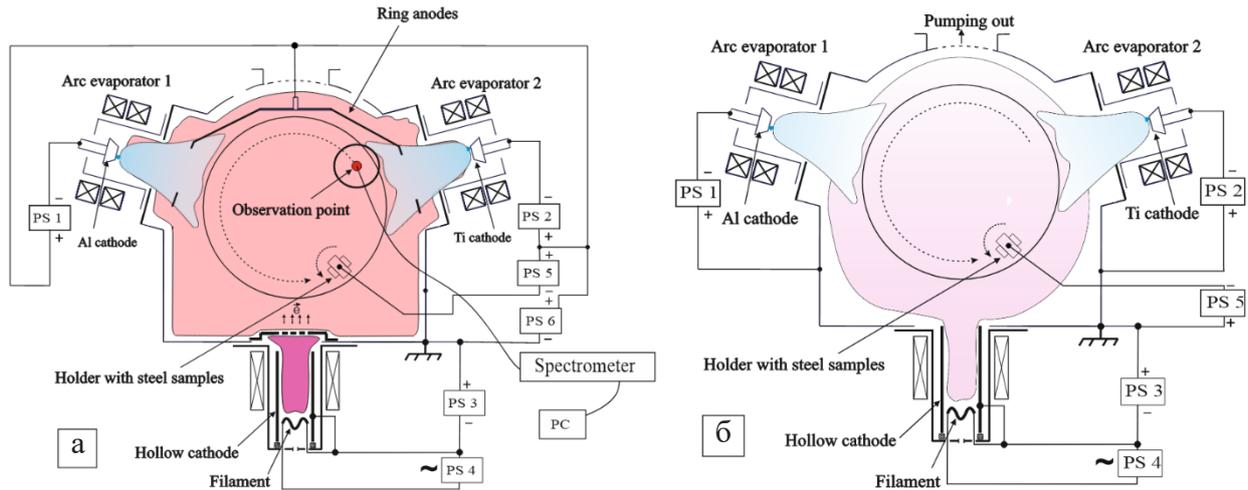


Рис. 1. Схемы экспериментальных установок для реализации процессов плазменно-ассистированного напыления:

а – разрядная схема для генерации газо-металлического пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом; б – традиционная разрядная схема

Fig. 1. Schemes of experimental installations for the implementation of vacuum-arc plasma-assisted deposition of coatings:

a – discharge scheme for generating gas-metal beam-plasma formation in a non-self-contained glow discharge with a hollow cathode; б – traditional discharge scheme

В традиционной разрядной схеме в качестве генераторов металлической плазмы используются два электродуговых испарителя. В качестве материалов катодов используются алюминиевый и титановый катоды. Для генерации газовой плазмы использовался плазменный источник с накалимым и полым катодом «ПИНК». Анодом являются стенки вакуумной камеры. Источник газовой плазмы формирует плазму с градиентом концентрации. Максимальная плотность потока газовых ионов характерна для области вблизи выходной апертуры генератора плазмы. Для источников металлической плазмы так же наблюдается градиент распределения концентрации плазмы с максимумом вблизи вакуумно-дуговых испарителей.

В разрядной схеме, представленной на рис. 1, а, газо-металлическое пучково-плазменное образование формировалось в полым катодом несамостоятельного тлеющего разряда. Несамостоятельный тлеющий разряд зажигается между стенками вакуумной камеры, которые являются полым катодом и кольцевыми анодами. Кольцевые аноды рас-

положены вблизи выходной апертуры вакуумно-дуговых испарителей и служат анодом для дуговых разрядов. Стабильное горение несамостоятельного тлеющего разряда при низких давлениях достигается путем дополнительной инжекции электронов из плазмы несамостоятельного дугового разряда с накалимым и полым катодом источника «ПИНК». Электрод, являющийся анодом для несамостоятельного дугового разряда в источнике «ПИНК», перекрывался мелкоструктурной сеткой с размером ячейки 0,4×0,4 мм, имеющей потенциал полого катода тлеющего разряда. Часть потока электронов, проходящая через ячейки сетки, ионизировала рабочий газ за счет ускорения в прикатодной области и осцилляции с заряженными частицами. Благодаря этому в рабочей области горения разряда создается пучково-плазменное образование с низкой степенью неоднородности. Снижению степени неоднородности способствует уменьшение рабочего давления, а также уменьшение соотношения $Sa:Sc$ до величины, равной $\approx(2me/M)^{1/2}$.

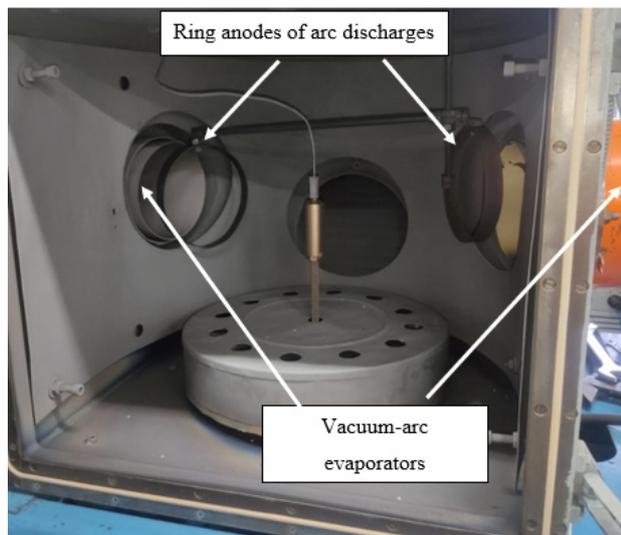


Рис. 2. Расположение кольцевых анодов в вакуумной камере

Fig. 2. Arrangement of annular anodes in the vacuum chamber

Для генерации металлической плазмы использовались два вакуумно-дуговых испа-

рителя. В качестве материала катода использовались цилиндрические катоды диаметром 80 мм из титана марки ВТ1-0 и алюминия марки А7.

2. Результаты и их обсуждение

Полученные в диапазоне длин волн 250–350 нм спектры имеют линии относительно высокой интенсивности, по которым можно определить влияние величины тока дугового испарителя на интенсивность переходов, характерных для ионов Ti и Al на измеренных эмиссионных спектрах газометаллического пучково-плазменного образования, формируемого в несамостоятельном тлеющем разряде.

На рис. 3 представлены изображения эмиссионных спектров, полученные в аргонной плазме при токе дугового испарителя (Ti) 80А.

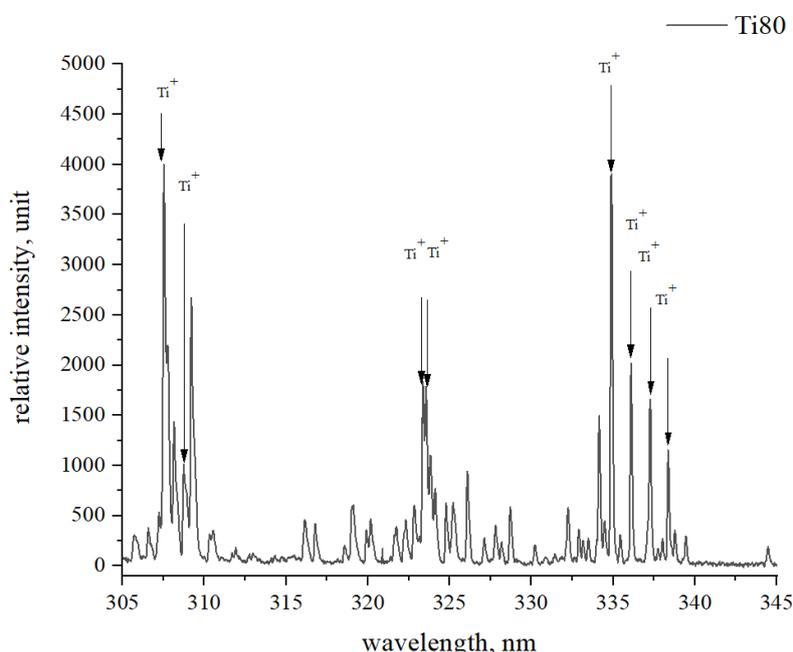


Рис. 3. Эмиссионные спектры газометаллического пучково-плазменного образования, ток дугового испарителя (Ti) 80А

Fig. 3. Emission spectra of gas-metal beam-plasma formation, vacuum-arc evaporator current (Ti) 80А

По результатам проведенных измерений были построены графики зависимости интенсивности эмиссионных спектров от тока разряда дугового испарителя, представленные на рис. 4. Графики строились для тока дугового разряда с алюминиевым катодом в атмосфере азота при давлении 0,5 Па и в атмосфере аргона при давлении 0,6 Па. Для определения интенсивности спектра эмиссии Al⁺ была выбрана линия, соответствующая длине волны 266,9 нм. Графики

для тока дугового разряда с титановым катодом так же получены в азотной атмосфере при давлении 0,5 Па и в аргоновой атмосфере при давлении 0,6 Па. Для ионов титана были выбраны линии на эмиссионных спектрах, представленные в табл. 1. Так как зависимости интенсивности излучения на всех линиях, характерных для Ti⁺ в спектрах, имеют схожую зависимость от тока разряда дугового испарителя, графики были построены для двух линий – 308,8 нм и 323,45 нм.

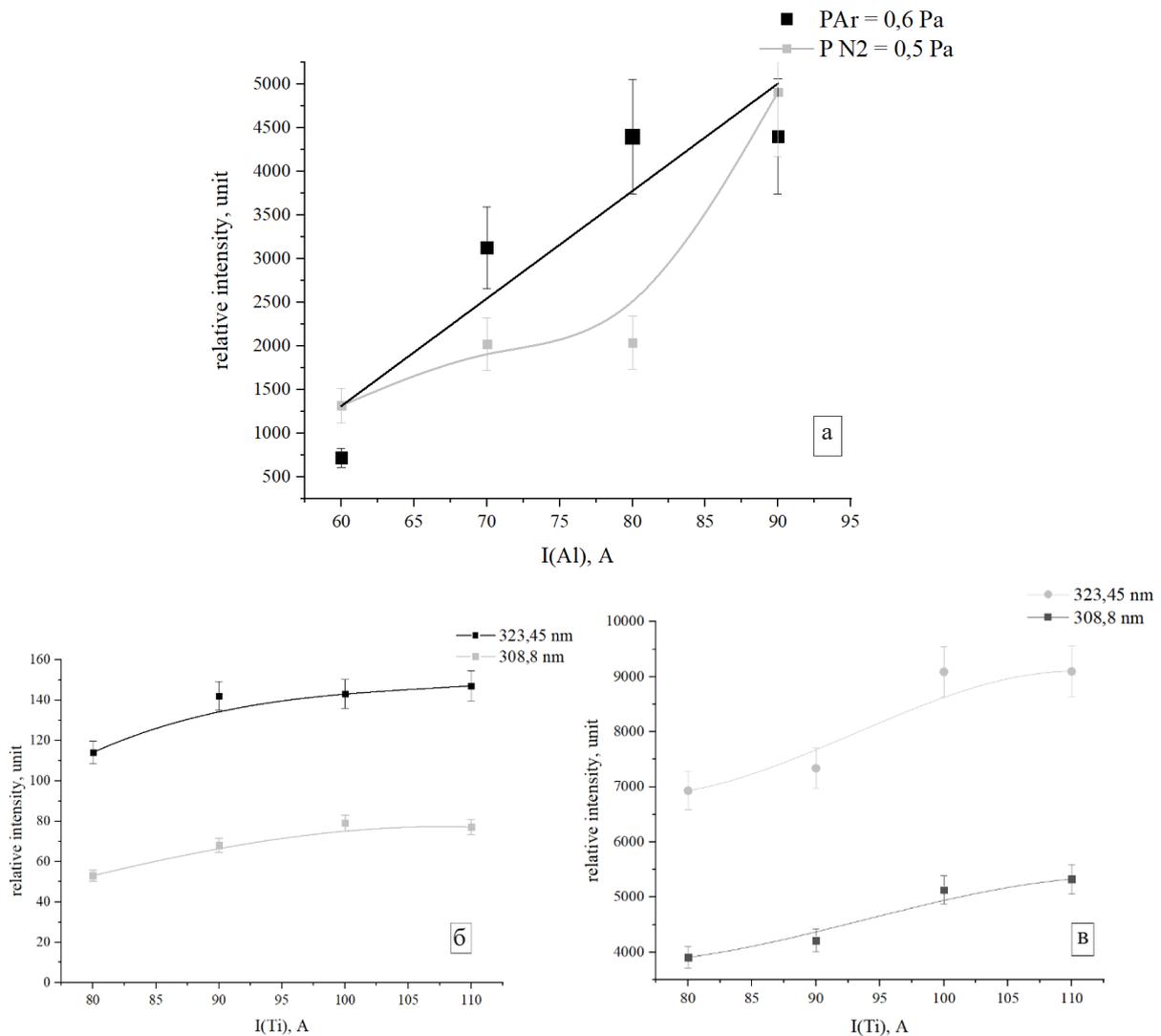


Рис. 4. Графики зависимостей интенсивности эмиссионных спектров от тока разряда дугового испарителя: а – при изменении тока разряда на алюминиевом катодe, $p(\text{Ar}) = 0,6 \text{ Па}$ и $p(\text{N}_2) = 0,5 \text{ Па}$; б – при изменении тока на титановом катодe $p(\text{Ar}) = 0,6 \text{ Па}$; в – при изменении тока на титановом катодe, $p(\text{N}_2) = 0,5 \text{ Па}$

Fig. 4. Graphs of the dependences of the intensity of the emission spectra on the discharge current of the arc evaporator: а – when the discharge current changes on the aluminum cathode, $p(\text{Ar}) = 0,6 \text{ Pa}$ and $p(\text{N}_2) = 0,5 \text{ Pa}$, б – when the current changes on the titanium cathode $p(\text{Ar}) = 0,6 \text{ Pa}$, в – when the current on the titanium cathode changes, $p(\text{N}_2) = 0,5 \text{ Pa}$

Анализируя полученные результаты, стоит отметить, что интенсивность исследуемых эмиссионных спектров имеет близкую к линейной зависимость от тока разряда дугового испарителя, что говорит об отсутствии резких изменений состава плазмы, эмитируемой при работе катодного пятна.

Анализ покрытий

Синтез покрытий производился в газометаллическом пучково-плазменном образовании, сформированном в полном катоде несамостоятельного тлеющего разряда, и газометаллическом плазменном образовании, сформированном в традиционной схеме.

Осаждалось композиционное покрытие, наносимое при испарении 2 катодов: композиционного катода состава TiBSiNi и катода из Zr – при плазменном ассистировании газовыми ионами в атмосфере (N₂/Ar) = (90/10)%.

Измерение микротвердости покрытий (Zr+Ti-B-Si-Ni)N, напыленных в традици-

онной разрядной схеме и в разрядной схеме для генерации пучково-плазменных образований, проводилось с помощью прибора KBW-1 (KB Pruftechnik GmbH, Германия) с использованием алмазной пирамиды Виккерса при нагрузке на индентор 0,1 Н (10 г) [18–20]. Измерение размеров отпечатков проводилось с помощью оптического микроскопа. Полученные результаты составляют 40,9 Гпа для покрытия, напыленного в традиционной разрядной схеме (рис. 1, а), и 47,8 Гпа для покрытия, напыленного в новой разрядной схеме (рис. 1, б).

На рис. 5 приведен характерный вид отпечатков Роквелла на поверхности образцов сплава VK8 при нагрузке 150 кг с нанесенным покрытием (Zr+Ti-B-Si-Ni)N в традиционной разрядной схеме (рис. 5, а) и после напыления при ассистировании газовыми ионами в пучково-плазменном образовании, формируемом в несамостоятельном тлеющем разряде (рис. 5, б).

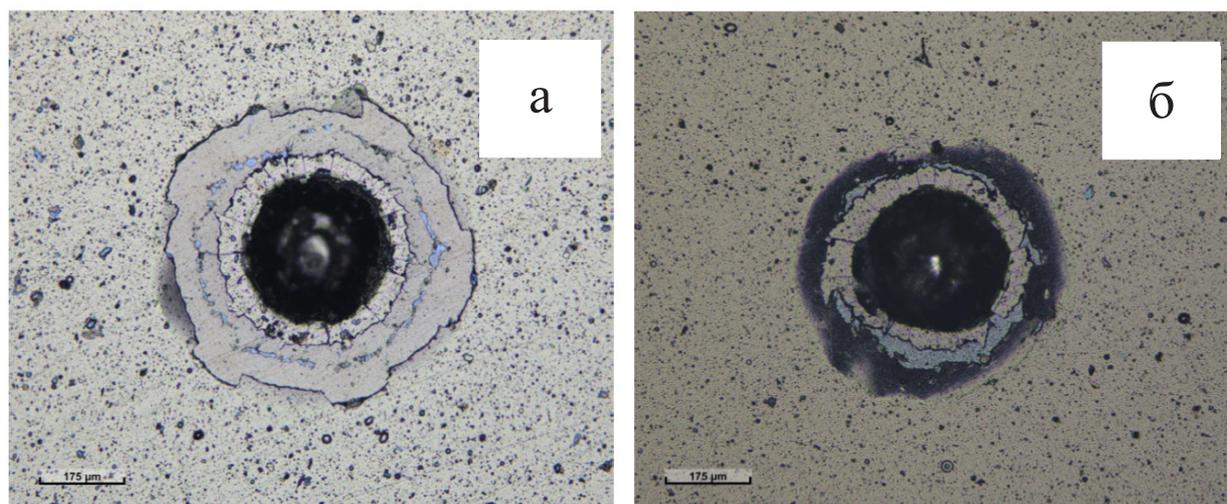


Рис. 5. Характерный вид отпечатков Роквелла покрытий на подложках из твердого сплава VK8, осажденных в традиционной разрядной схеме (а); и в разрядной схеме для генерации пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом (б)

Fig. 5. Characteristic appearance of Rockwell indentations of coatings, deposited on VK8 hard alloy substrates:
a – in traditional discharge scheme, *б* – in a discharge circuit for generating a beam-plasma formation in a non-self-sustained glow discharge with a hollow cathode

Методом рентгенофазового анализа с использованием синхротронного излучения проводилось исследование стойкости к высокотемпературному окислению и стабильность структурно-фазового состояния покрытий (Zr+Ti-B-Si-Ni)N в диапазоне температур $30\div 1300$ °C (рис. 6). Источником синхротронного излучения являлся накопитель электронов ВЭПП-3 (Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск). Исследование проводили с использованием высокотемпературной рентгеновской камеры НТК-2000, позиционно-чувствительного однокоординатного детектора ОД-3М-350, программного обеспечения – программы для обработки результатов измерений Fityk v.1.3.1. Исследования проводили для следующих условий эксперимента: рабочая длина волны излучения $\lambda = 0,172$ нм, диапазон углов дифракции 2Θ : $28\text{--}59^\circ$, скорость нагрева образцов 10 °C/мин. Обработка результатов измерений производилась с использованием программы для обработки результатов измерений Fityk v.1.3.1.

В процессе нагрева образца покрытия (рис. 7) (Zr+Ti-B-Si-Ni)N на воздухе установлено, что структура покрытия стабильна до температур ~ 700 °C. Выше указанной температуры происходит реорганизация структурно-фазового состояния покрытия, проявляющаяся в исчезновении рефлексов нитрида циркония (ZrN) в области углов $\sim 40^\circ$ и 57° и появлении широкого рефлекса в области 50° , относящегося к оксиду циркония (ZrO_2). Наблюдаемое структурно-фазовое преобразование согласуется с результатами РФА для покрытия (Zr+Ti-B-Si-Ni)N после отжига при $T = 700$ °C. Далее, при температуре $\sim 1030^\circ\text{C}$ начинается интенсивное окисление материала покрытия, широкие рефлексы исчезают, которые соответствовали нитриду циркония ($\sim 34^\circ$) и оксиду циркония ($\sim 50^\circ$) и появляется группа слабых узких рефлексов. При температуре ~ 1140 °C происходит разрушение образца и выход дифрагирующей поверхности из оптической геометрии дифрактометра, все рефлексы от покрытия исчезают.

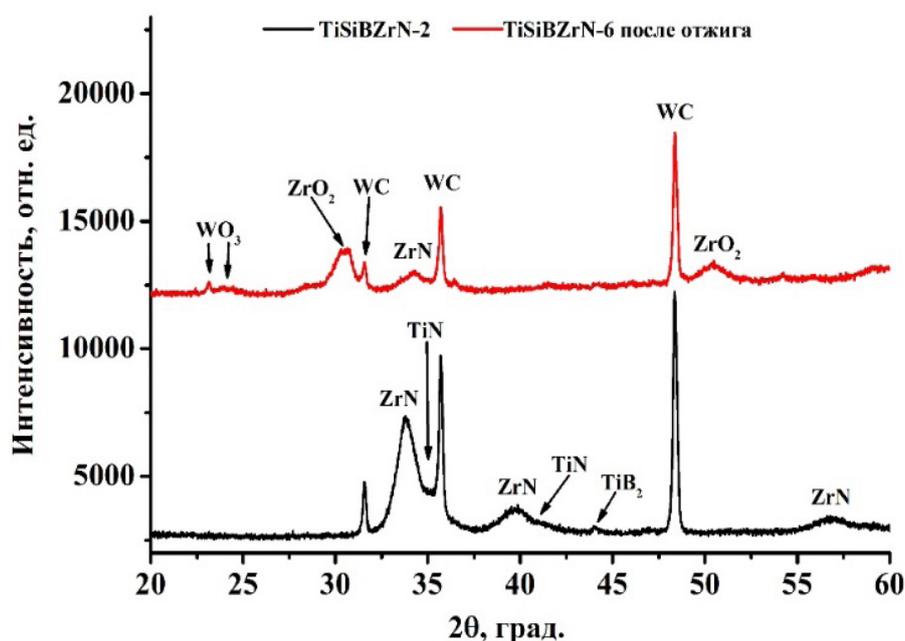


Рис. 6. Результаты рентгенофазового анализа покрытия (Zr+Ti-B-Si-Ni)N до (нижний график) и после (верхний график) отжига при 700 °C в течение 1 ч

Fig. 6. Results of X-ray phase analysis of the (Zr+Ti-B-Si-Ni)N coating before (lower graph) and after (upper graph) annealing at 700 °C for 1 h

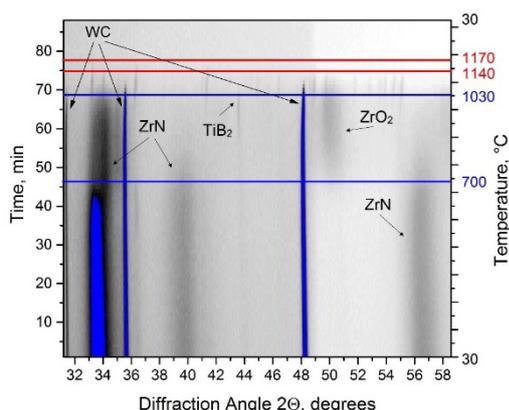


Рис. 7. Серия рентгенограмм покрытия (Zr+Ti-B-Si-Ni)N на подложке из сплава ВК8, полученных в процессе нагрева на воздухе до температуры 1170 °С и последующего охлаждения до 30 °С

Fig. 7. A series of X-ray diffraction patterns of the (Zr+Ti-B-Si-Ni)N coating on a VK8 alloy substrate obtained during heating in air to a temperature of 1170 °C and subsequent cooling to 30 °C

Выводы

В результате выполнения данной работы были получены эмиссионные спектры, характерные для ионов титана и алюминия, в газо-металлическом пучково-плазменном образовании на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом. Анализируя полученные результаты, можно отметить, что интенсивность эмиссионных спектров имеет близкую к линейной зависимость от тока разряда источника металлической плазмы. В связи с этим можно сделать вывод об отсутствии резкого изменения в составе плазмы, эмитируемой с катодного пятна.

Анализируя данные, полученные при изучении свойств покрытий, синтезированных плазменно-ассистированным вакуумно-дуговым методом, полученных в разных разрядных схемах, стоит отметить значение микротвердости для покрытия (Zr+Ti-B-Si-Ni)N, которое составляет 40,9 ГПа для покрытия, напыленного в традиционной разрядной схеме, и 47,8 ГПа для покрытия, напыленного в разрядной схеме для генерации пучково-плазменных образований. Выявлен-

ные высокие значения твердости покрытия, а также достаточная адгезия покрытия к подложке позволяют предположить, что данное покрытие, напыленное в газо-металлическом пучково-плазменном образовании, имеет перспективу использования для упрочнения режущих инструментов при резании труднообрабатываемых материалов, в частности закаленных сталей и сплавов.

Благодарности / Acknowledgments

Работы по исследованию закономерностей влияния состава газовой и металлической плазмы от условий генерации пучково-плазменного образования, сформированного в несамостоятельном тлеющем разряде, выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

Исследование характеристик покрытия выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект №075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 3.1.18.

The work on the study of the regularities of the influence of the composition of gas and metal plasma on the conditions for generating a beam-plasma formation based on a non-self-sustained glow discharge was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on topic No. FWRM-2022-0001.

The study of the characteristics of the coating was carried out with the financial support of the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education (project No. 075-15-2021-1348) as part of arrangement No. 3.1.18.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верещака А. С., Дачева А. В., Анисеев А. И. Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем комплексного применения наноструктуриро-

ванного износостойкого покрытия и твердого сплава оптимального состава // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. Т. 4, № 1. С. 99–106. DOI: 10.17816/2074-0530-69607.

2. Beilis I. I. Vacuum Arc Cathode Spot Theory: History and Evolution of the Mechanisms // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. V. 47, Iss. 8. P. 3412–3433. DOI: 10.1109/TPS.2019.2904324.

3. Konyashin I., Fox-Rabinovich G., Dodonov A. TiN thin films deposited by filtered arc-evaporation: structure, properties and applications // Journal of Materials Science. 1997. V. 32. P. 6029–6038. DOI: 10.1023/A:1018679414707.

4. Gabriel H. M., Kloos K. H. Morphology and structure of ion-plated TiN, TiC and Ti(C, N) coatings // Thin Solid Films. 1984. V. 118, Iss. 3. P. 243–254. DOI: 10.1016/0040-6090(84)90195-0.

5. Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. 236 с.

6. Mukhtar S. H., Wani M. F., Sehda R., Sharma M. D. Nano-mechanical and nano-tribological characterisation of self-lubricating MoS₂ nano-structured coating for space applications // Tribology International. 2023. V. 178, Part A. Article number 108017. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.108017.

7. Vardanyan E. L., Ramazanov K. N., Nagimov R. S., Nazarov, A. Yu. Properties of intermetallic Ti Al based coatings deposited on ultrafine grained martensitic steel // Surface and Coatings Technology. 2020. V. 389. Article number 125657. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125657.

8. Denisova Yu. A., Denisov V. V., Ostroverkhov E. V. Influence of ion-plasma nitriding on wear-resistance of Cr6VW die steel // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1115. Article number 032024. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032024.

9. Xing Y., Luo Ch., Zhu M., Zhao Y., Ehmman K., Wu Z., Liu L. Assessment of self-lubricating coated cutting tools fabricated by laser additive manufacturing technology for friction-reduction // Journal of Materials Processing Technology. 2023. V. 318. Article number 118010. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.118010.

10. Kazlauskas D., Jankauskas V., Kreivaitis R., Tuckute S. Wear behaviour of PVD coating strengthened WC-co cutters during milling of oak-wood // Wear. 2022. V. 498–499. Article number 204336. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204336.

11. Gabor R., Cvrček L., Doubková M., Nehasil V., Hlinka J., Unucka P., Buřil M., Podepřelová A., Seidlerová J., Bačáková L. Hybrid coatings for orthopaedic implants

formed by physical vapour deposition and microarc oxidation // Materials & Design. 2022. V. 219. Article number 110811. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110811.

12. Yunusov R. F., Garipov M. M. Features of Glow Discharge burning between a hollow cathode and a mesh anode // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1588. Article number 012064. DOI: 10.1088/1742-6596/1588/1/012064.

13. Akhmadeev Yu. H., Denisov V. V., Koval N. N., Kovalsky S. S., Lopatin I. V., Schanin P. M., Yakovlev V. V. Generation of uniform low-temperature plasma in a pulsed non-self-sustained glow discharge with a large-area hollow cathode // Plasma Physics Reports. 2017. V. 43, Iss. 1. P. 67–74. DOI: 10.1134/s1063780x17010020.

14. Oks E. M., Vizir A. V., Yushkov G. Yu. Low pressure hollow cathode glow discharge plasma for broad beam gaseous ion source // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. P. 853–855. DOI: 10.1063/1.1148580.

15. Denisov V. V., Akhmadeev Yu. H., Lopatin I. V., Schanin P. M., Kovalsky S. S., Koval N. N., Yakovlev V. V. Pulsed non-self-sustained glow discharge with a large-area hollow cathode for nitriding of iron-based alloys // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015. V. 81. Article number 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/81/1/012067.

16. Денисов В. В., Ахмадеев Ю. Х., Коваль Н. Н., Лопатин И. В., Островерхов Е. В. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом при низких напряжениях горения // Известия вузов: Физика. 2019. Т. 62, № 4. С. 3–8. DOI: 10.17223/00213411/62/4/3.

17. Denisov V. V., Akhmadeev Yu. H., Koval N. N., Kovalsky S. S., Lopatin I. V., Ostroverkhov E. V., Pedin N. N., Yakovlev V. V., Schanin P. M. The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. Article number 123510. DOI: 10.1063/1.5126485.

18. Panich N., Sun Y. Effect of penetration depth on indentation response of soft coatings on hard substrates: a finite element analysis // Surface and Coatings Technology. 2004. V. 182, Iss. 2–3. P. 342–350. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.07.002.

19. Sun Y., Bell T., Zheng S. Finite element analysis of the critical ratio of coating thickness to indentation depth for coating property measurements by nanoindentation // Thin Solid Films. 1995. V. 258, Iss. 1–2. P. 198–204. DOI: 10.1016/0040-6090(94)06357-5.

20. Самсонов Г. В., Виницкий И. М. Тугоплавкие соединения (справочник). М.: «Металлургия», 1976. 560 с.