

**EFFECT OF BIAS POTENTIAL ON THE PHASE COMPOSITION,  
STRUCTURE AND PROPERTIES OF CrALYN/CrALYO  
VACUUM-ARC MULTILAYER COATINGS**

*Andrey Andreevich Leonov<sup>1a</sup>, Yulia Alexandrovna Denisova<sup>1</sup>, Vladimir Viktorovich Denisov<sup>1</sup>,  
Mikhail Viktorovich Savchuk<sup>1</sup>, Viktor Mikhailovich Savostikov<sup>1</sup>,  
Vyacheslav Sergeevich Velikoselsky<sup>1</sup>, Aleksandr Nikolayevich Shmakov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Institute of High Current Electronics SB RAS, pr. Academichesky 2/3, Tomsk, 634055, Russia

<sup>2</sup> Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrentiev 11, Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>a</sup> laa-91@yandex.ru

**ABSTRACT**

The article presents the results of a study of multilayer (32 layers) CrAlYN/CrAlYO coatings obtained by vacuum-arc plasma-assisted deposition on a WC8 (WC + 8% Co) hard alloy substrate. The effect of the substrate bias potential ( $U_{cm}$ : -50, -75, and -100 V) on the phase composition, crystal structure parameters, thickness, roughness, surface morphology, and mechanical properties has been studied. X-ray diffraction analysis revealed that the resulting multilayer coatings have a multiphase structure consisting of phases of nitrides (CrN and AlN) and oxides (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AlYO<sub>3</sub>). With an increase in the negative bias potential from 50 to 75 V, a decrease in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from 52 to 18 % and an increase in CrN from 26 to 39 % were observed, which led to the lowest microvoltages for both phases ( $\Delta d/d \times 10^{-3} = 1.9$ ). The size of the CSR of all phases was in the range from 15 to 19 nm and practically did not depend on  $U_b$ . It was found that an increase in the bias potential from 50 to 100 V led to a decrease in the thickness of the formed coating and a decrease in the roughness according to the Rz criterion, which indicated a decrease in the droplet phase, confirmed by optical microscopy. It was found that increasing  $U_b$  from 50 to 100 V led to an increase in the hardness (H) of the coatings from 17.2 to 19.9 GPa, however, the coating obtained at 75 V had the highest values of H/E and H<sup>3</sup>/E<sup>2</sup>. Using X-ray phase analysis using synchrotron radiation, it was found that the resulting CrAlYN/CrAlYO multilayer coatings retained thermal stability during heating in air to a temperature of ~1020 °C.

**KEYWORDS**

Multilayer coatings; vacuum-arc deposition; phase composition; mechanical properties.

**ВЛИЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛА СМЕЩЕНИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ,  
СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ  
ПОКРЫТИЙ CrALYN/CrALYO**

*Андрей Андреевич Леонов<sup>1а</sup>, Юлия Александровна Денисова<sup>1</sup>, Владимир Викторович Денисов<sup>1</sup>,  
Михаил Викторович Савчук<sup>1</sup>, Виктор Михайлович Савостиков<sup>1</sup>,  
Вячеслав Сергеевич Великосельский<sup>1</sup>, Александр Николаевич Шмаков<sup>2</sup>*

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

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

<sup>a</sup> laa-91@yandex.ru

---

## АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследования многослойных (32 слоя) покрытий CrAlYN/CrAlYO полученных вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным напылением на подложку из твердого сплава ВК8 (WC+8% Co). Исследовано влияние потенциала смещения подложки ( $U_{см}$ : -50, -75 и -100 В) на фазовый состав, параметры кристаллической структуры, толщину, шероховатость, морфологию поверхности и физико-механические свойства. Рентгеноструктурным анализом обнаружено, что полученные многослойные покрытия имеют многофазную структуру, состоящую из фаз нитридов (CrN и AlN) и оксидов ( $Cr_2O_3$  и  $AlYO_3$ ). При увеличении отрицательного потенциала смещения с 50 до 75 В наблюдалось снижение  $Cr_2O_3$  с 52 до 18% и увеличение CrN с 26 до 39%, что привело к наименьшим микронапряжениям для обеих фаз ( $\Delta d/d \times 10^{-3} = 1,9$ ). Размер ОКР всех фаз находился в пределах от 15 до 19 нм и практически не зависел от  $U_{см}$ . Установлено, что увеличение потенциала смещения с 50 до 100 В приводило к уменьшению толщины формируемого покрытия и снижению шероховатости по критерию Rz, что свидетельствовало об уменьшении капельной фазы, подтвержденной оптической микроскопией. Обнаружено, что увеличение  $U_{см}$  с 50 до 100 В приводило к повышению твердости (H) покрытий с 17,2 до 19,9 ГПа, однако, покрытие, полученное при 75 В, обладало наивысшими значениями H/E и  $H^3/E^2$ . Методом рентгенофазового анализа с использованием синхротронного излучения обнаружено, что полученные многослойные покрытия CrAlYN/CrAlYO сохраняли термическую стойкость в процессе нагрева на воздухе до температуры  $\sim 1020$  °С.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Многослойные покрытия; вакуумно-дуговое осаждение; фазовый состав; физико-механические свойства.

### Введение

Развитие ряда таких высокотехнологичных отраслей промышленности, как атомная, авиационная, космическая, химическая, требует улучшения эксплуатационных свойств разных групп материалов. Жесточайшие условия работы характерны, например, для специального класса жаростойких материалов. Например, лопатки турбин в авиационных двигателях испытывают циклические термические нагрузки с пиковыми температурами до 1500 °С в воздушной атмосфере в условиях воздействия абразивных частиц пыли. Несмотря на серьезные успехи в разработке жаростойких и коррозионностойких материалов и покрытий [1] с рабочей

температурой до 1500 °С для авиационной промышленности, круг решаемых вопросов не уменьшается. Применение многослойных покрытий с разным составом слоев (мягкой и твердой фазы) позволяет уменьшить величину внутренних напряжений и снизить их хрупкость при достаточно высокой твердости. Чередование слоев, обладающих различными физико-механическими характеристиками, позволяет в значительной степени изменять свойства многослойных покрытий, такие как условия концентрации напряжений и распространение трещин, в результате чего повышается вязкость разрушения такого покрытия [2–4]. Кроме того, многослойная структура покрытий, кото-

рая препятствует распространению трещин, способствует ограничению проникновения агрессивной среды к подложке, тем самым снижая скорость изнашивания и повышая коррозионную стойкость. Одной из перспективных многослойных систем является комбинация нитридов и оксидов на основе хрома, алюминия. Нитрид хрома проявляет высокую температурную стабильность и имеет весьма низкий коэффициент трения. Было показано, что введение химически активных элементов, таких как иттрий (Y), в покрытия на основе CrAlN повышает температурную стабильность и улучшает физико-механические свойства [5, 6]. Считается, что иттрий в этих случаях эффективно тормозит диффузионные процессы при окислении и коррозионном воздействии, возможно, за счет сегрегации по границам зерен нитрида [5]. Фазы оксида иттрия являются еще более высокотемпературными, чем Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Предполагается, что комбинация свойств оксидов Cr, Al и Y позволяет создавать композиционные слои с еще более высокой жаростойкостью. В результате такое сочетание нитридов и оксидов позволит достичь высокой твердости и износостойкости покрытия при этом с устойчивостью к окислению и прочим воздействиям агрессивной среды. Целью данной работы являлось получение многослойных покрытий CrAlYN/CrAlYO и исследование влияния потенциала смещения подложки на фазовый состав, параметры кристаллической структуры, толщину, шероховатость, морфологию поверхности и физико-механические свойства покрытий, а также исследование термической стойкости в процессе нагрева на воздухе методом рентгенофазового анализа использованием синхротронного излучения.

## 1. Материалы и методы исследования

Осаждения многослойных покрытий CrAlYN/CrAlYO проводили методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления на установке ППУ-1 (модернизированная ННВ6.6-И1) [7], оснащенной двумя электродуговыми испарителями с диаметром

катода 80 мм, дополнительным источником газовой азотсодержащей плазмы «ПИНК» (плазменный источник с полым накаливаемым катодом) и дополнительным источником газовой кислородсодержащей плазмы «ПИПК» (плазменный источник с интегрально холодным полым катодом). Установка имела систему планетарного вращения держателя образцов, систему напуска двух газов (N<sub>2</sub> и Ar) через плазменный источник «ПИНК» и систему напуска двух газов (O<sub>2</sub> и Ar) через плазменный источник «ПИПК». Электродуговые испарители с Cr (чистота 99,5%) и AlY (1,5 масс.% Y) катодами располагались на боковых стенках рабочей камеры. Источник газовой плазмы «ПИНК» располагался на двери вакуумной камеры, а источник «ПИПК» располагался на верхней стенке. Анодом для источников металлической и газовой плазмы являлись внутренние стенки вакуумной камеры из нержавеющей стали. Источник газовой плазмы «ПИНК» использовался для очистки поверхности образцов ионной бомбардировкой, нагрева образцов и дополнительной ионизации как газовой компоненты плазмы, осуществляющей ассистирующее воздействие на растущие слои покрытия, так и металлической компоненты плазмы.

Образцы диаметром 10 мм и толщиной 7 мм в виде цилиндров для нанесения покрытий были изготовлены из твердого сплава BK8 (WC + 8% Co). Образцы были предварительно отполированы и перед загрузкой в вакуумную камеру очищались в ультразвуковой ванне в бензине, а затем в ацетоне. Во время процесса осаждения покрытий держатель с образцами вращался вокруг центральной оси вакуумной камеры на расстоянии 200 мм от нее, а также вокруг своей оси. До начала эксперимента вакуумная камера откачивалась турбомолекулярным насосом ТМН-1000 до предельного давления 10<sup>-3</sup> Па. Подачей рабочего газа аргона через плазменный источник «ПИНК» рабочее давление устанавливалось на уровне 0,3 Па. При зажигании газового разряда и приложении потенциала смещения U<sub>см</sub> величиной –600 В на держатель с образцами осуществлялся нагрев

подложек до температуры около 500 °С. После очистки поверхности образцов ионной бомбардировкой и ее химической активации производилось одновременное зажигание разрядов в электродуговых испарителях и напыление покрытия.

Перед получением многослойных покрытий на подложку наносили слой хрома толщиной до 100 нм в атмосфере аргона. Многослойное покрытие с чередующимися слоями CrAlYN и CrAlYO формировали путем последовательного напуска рабочей газовой смеси ( $N_2(80\%) + Ar(20\%)$ ) и ( $O_2(60\%) + Ar(40\%)$ ). На основе наших предыдущих исследований многослойных покрытий был выбран базовый вариант архитектурного построения, включающий 32 чередующихся слоя [8, 9] нитридов и оксидов хрома, алюминия, иттрия, осаждаемых при давлении рабочего газа  $P_{N_2/Ar} = 0,4$  Па и  $P_{O_2/Ar} = 0,6$  Па. Для определения влияния потенциала смещения  $U_{см}$  плазменно-ассистированного вакуумно-дугового напыления на структуру и свойства покрытий выбирали три значения  $U_{см}$ : -50, -75 и -100 В, а образцы обозначили 50, 75 и 100 соответственно. Ток «ПИНК» при осаждении нитридных слоев CrAlYN –  $I_{ПИНК} = 75$  А. Ток «ПИНК» при осаждении оксидных слоев CrAlYO –  $I_{ПИНК} = 25$  А. Ток «ПИПК» при осаждении оксидных слоев CrAlYO –  $I_{ПИПК} = 55$  А. Ток электродугового испарителя с Cr катодом –  $I_{dCr} = 90$  А. Ток электродугового испарителя с AlY катодом –  $I_{dAlY} = 55$  А. Общее время осаждения всех покрытий – 128 мин. Температура осаждения покрытий составляла 300–320 °С.

Фазовый состав покрытий определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Shimadzu XRD-7000S (Япония) с излучением CuK $\alpha$ . Анализ фазового состава проведен с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полно-профильного анализа POWDER CELL 2.4. Методом калотестирования измеряли толщину осажденных многослойных покрытий. Шероховатость поверхности многослойных покрытий определяли с помощью контакт-

ного профилометра Tribotechnic (Франция). Измерения нанотвердости  $H$  и модуля упругости  $E$  полученных многослойных покрытий производили на нанотвердомере NANO Hardness Tester NHT-S-AX-000X (CSEM, Швейцария) при максимальной нагрузке на алмазный индентор Берковича 10 мН. Анализ данных наноиндентирования проводился методом Оливера-Фарра. Оптические изображения поверхностей покрытий и лунок после калотестирования получали с помощью инвертированного микроскопа Leica DMi8M (Leica Microsystems, Германия). Многослойное покрытие CrAlYN/CrAlYO на подложке BK8 (Д×Ш×В – 12×5×0,5 мм) было исследовано на предмет устойчивости к воздействию высоких температур в окислительной среде (на воздухе). Эксперимент был выполнен на дифрактометре In Situ станции «Прецизионная Дифрактометрия II» на канале синхротронного излучения №6 накопителя электронов ВЭПП-3 (Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия). Нагрев образца осуществляли в рентгеновской высокотемпературной камере Anton Paar НТК-2000 платиновым нагревателем, который одновременно являлся держателем образца. Рабочая длина волны излучения  $\lambda=0,172$  нм, скорость нагрева образца 15 °С/мин, диапазон температур 30÷1300 °С. Регистрация рентгеновских дифрактограмм производилась с использованием позиционно-чувствительного однокоординатного детектора ОД-3М-350, время экспозиции 1 мин/кадр. Обработка результатов измерений производилась с использованием программы для обработки результатов измерений Fityk v.1.3.1.

## 2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены рентгеновские дифрактограммы, полученные с многослойных покрытий CrAlYN/CrAlYO. В табл. 1 представлен фазовый состав и параметры кристаллической структуры исследуемых покрытий CrAlYN/CrAlYO. Во всех исследованных покрытиях, помимо карбида вольфрама (подложка), зафиксировано на-

личие нитридов хрома CrN (от 26 до 39%) и алюминия AlN (от 3 до 11%) с границей ориентированной кубической решеткой (рис. 1). Можно отметить, что количественное содержание CrN во всех случаях заметно превышает содержание AlN (табл. 1). Оксид  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ромбоэдрического вида также присутствует во всех исследованных вариантах, с разницей в его содержании для конкретных видов

покрытий от 18 до 52%. Оксид  $\text{AlYO}_3$  обнаружен в гораздо меньших количествах (менее 3%) в покрытиях, исключая образец 50. Размер ОКР всех обнаруженных фаз находится в пределах от 15 до 19 нм. Отношение  $\Delta d/d \times 10^{-3}$ , определяющее микронапряжения кристаллической решетки преобладающих фаз CrN, варьируется от 1,9 до 6, а  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  от 1,9 до 4,8 (табл. 1).

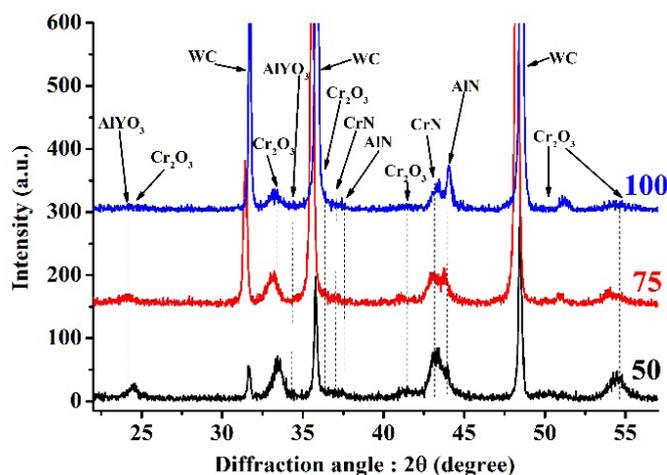


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы исследуемых многослойных покрытий CrAlYN/CrAlYO

Fig. 1. XRD patterns of the investigated CrAlYN/CrAlYO multilayer coatings

Таблица 1. Фазовый состав и параметры кристаллической структуры исследуемых многослойных покрытий CrAlYN/CrAlYO

Table 1. Phase composition and crystal structure parameters of the investigated CrAlYN/CrAlYO multilayer coatings

| Образец / Sample | Обнаруженные фазы / Detected phases | Содержание фаз, % / Phase content, % | Размер ОКР, нм / CSR size, nm | $\Delta d/d \times 10^{-3}$ |
|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 50               | WC                                  | 10                                   | 64                            | 2,2                         |
|                  | $\text{Cr}_2\text{O}_3$             | 52                                   | 16                            | 3,5                         |
|                  | AlN                                 | 11                                   | 15                            | 4,2                         |
|                  | CrN                                 | 26                                   | 19                            | 4,8                         |
|                  | $\text{AlYO}_3$                     | <3                                   | –                             | –                           |
| 75               | WC                                  | 40                                   | 52                            | 1,6                         |
|                  | $\text{Cr}_2\text{O}_3$             | 18                                   | 18                            | 1,9                         |
|                  | AlN                                 | <3                                   | –                             | –                           |
|                  | CrN                                 | 39                                   | 16                            | 1,9                         |
| 100              | WC                                  | 44                                   | 50                            | 0,5                         |
|                  | $\text{Cr}_2\text{O}_3$             | 25                                   | 16                            | 4,8                         |
|                  | AlN                                 | <3                                   | –                             | –                           |
|                  | CrN                                 | 27                                   | 17                            | 6                           |
|                  | $\text{AlYO}_3$                     | <3                                   | –                             | –                           |

В табл. 2 представлены результаты измерения толщины, шероховатости и результаты наноиндентирования покрытий. Из табл. 2 видно, что при увеличении потенциала смещения с 50 до 100 В наблюдается уменьшение толщины покрытий с 3,6 до 0,8 мкм. Вероятно, уменьшение толщины покрытий связано с тем, что отрицательное  $U_{см}$  дает дополнительную энергетическую стимуляцию процесса осаждения, при которой бомбардировка растущей поверхности покрытия ионами рабочего газа приводит к росту дефектов упаковки, увеличению микронапряжений ( $\Delta d/d$ ) и частичному распылению поверхности покрытия.

Шероховатость по критерию  $R_a$  для покрытий 50, 75 и 100 фактически одинакова и составляет 0,034–0,036 мкм. В то же время шероховатость по критерию  $R_z$  для покрытия 100 (0,310 мкм) заметно меньше, чем для покрытий 50 и 75 (0,433 и 0,456 мкм соответственно). Эти данные коррелируют с изображениями поверхностей соответствующих покрытий (рис. 2, а, б, в). Из сравнения изображений видно, что доля капельной состав-

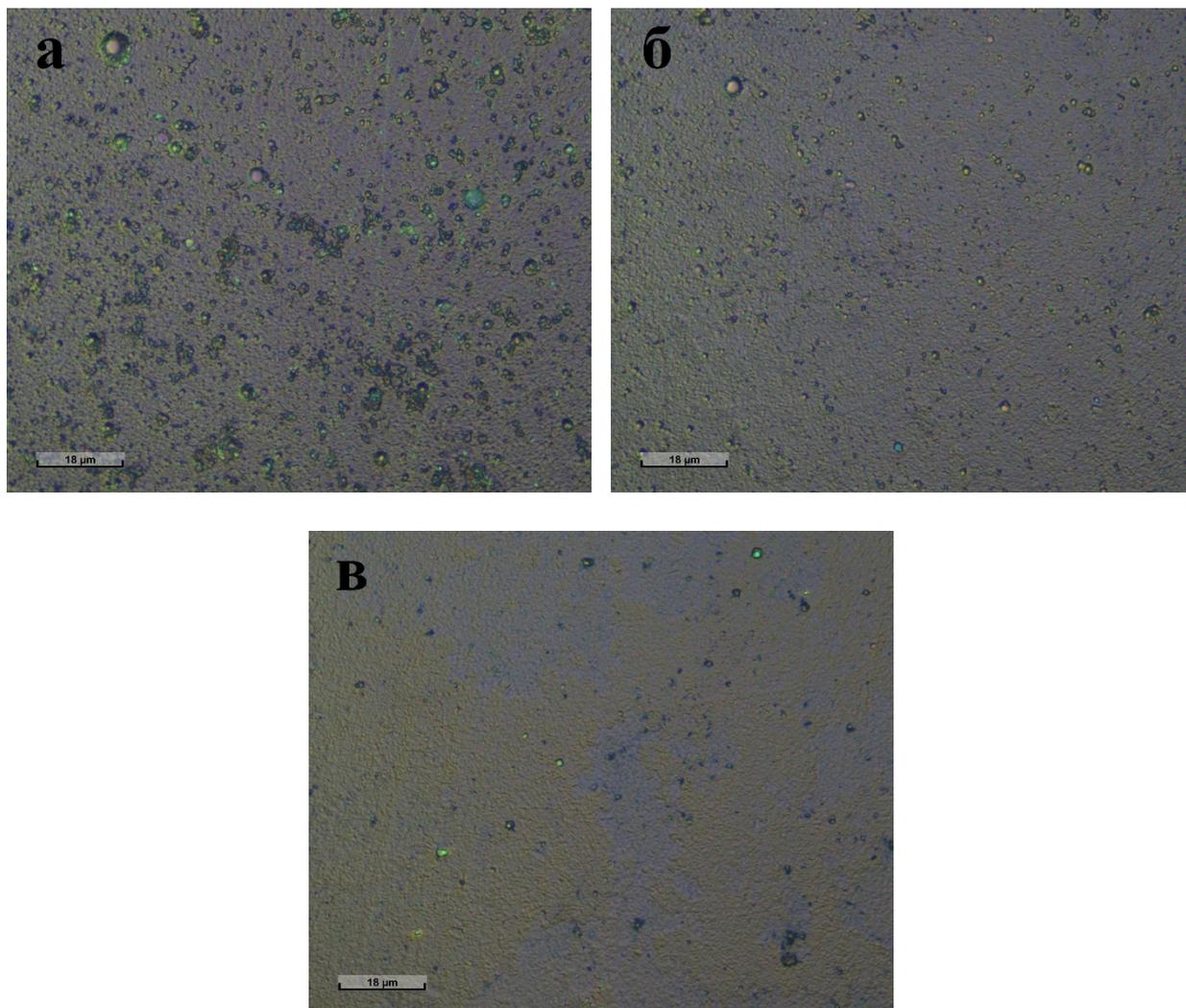
ляющей для покрытий 75 и 100 существенно меньше, чем для покрытия 50.

Физико-механические свойства покрытий исследовались путем наноиндентирования. На основе обработки данных по методу Оливера-Фарра с помощью специализированного программного обеспечения были установлены значения нанотвердости ( $H$ ) и модуля упругости ( $E$ ) (табл. 2). При увеличении отрицательного потенциала смещения с 50 В до 100 В для многослойных покрытий твердость ( $H$ ) увеличивается с 17,2 до 19,9 ГПа (табл. 2), что, вероятно, связано с уменьшением капельной фазы в составе покрытий (рис. 2, а, б, в). Модуль упругости ( $E$ ) уменьшается при подаче потенциала смещения 75 от 257,6 ГПа (50 В) до 225,8 ГПа и впоследствии повышается до 280,6 ГПа с увеличением смещения до 100 В (табл. 2). Соотношение  $H/E$  часто используется как мера оценки сопротивления покрытия упругой деформации, при этом считается, что  $H/E$  большее или равное 0,1 указывает на его высокое качество. Из полученных данных следует (табл. 2), что исследуемые покрытия можно считать недостаточно качественными.

**Таблица 2.** Характеристики исследуемых многослойных покрытий CrAlYN/CrAlYO

**Table 2.** Characteristics of the investigated CrAlYN/CrAlYO multilayer coatings

| Характеристика /<br>Characteristic  | Образец /<br>Sample |                  |                  |
|---|---------------------|------------------|------------------|
|   | 50                  | 75               | 100              |
| Толщина, мкм /<br>Thickness, $\mu\text{m}$  | 3,6                 | 1,8              | 0,8              |
| Шероховатость $R_a/R_z$ ,<br>мкм/мкм /<br>Roughness $R_a/R_z$ , $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ | 0,034/0,433         | 0,036/0,456      | 0,034/0,310      |
| $H$ , GPa   | $17,2 \pm 4,1$      | $18,0 \pm 3,7$   | $19,9 \pm 4,7$   |
| $E$ , GPa   | $257,6 \pm 66,3$    | $225,8 \pm 26,9$ | $280,6 \pm 50,6$ |
| $H/E$   | 0,07                | 0,08             | 0,07             |
| $H^3/E^2$   | 0,08                | 0,11             | 0,10             |

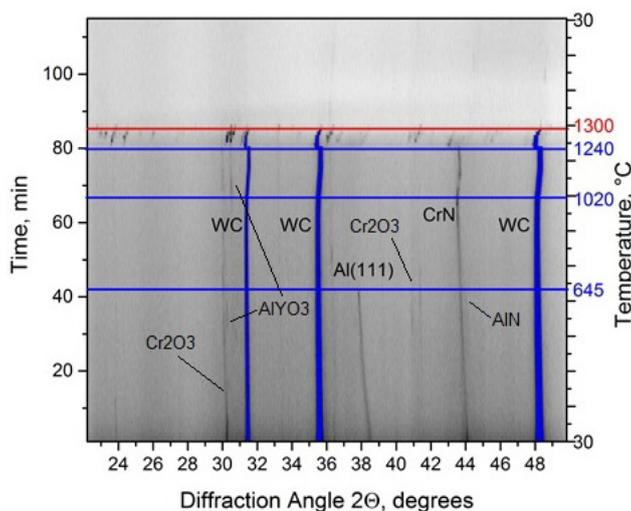


**Рис. 2.** Оптические изображения поверхностей исследуемых многослойных покрытий CrAlYN/CrAlYO:  
*a* – 50; *б* – 75; *в* – 100

**Fig. 2.** Optical images of the surfaces of the investigated CrAlYN/CrAlYO multilayer coatings:  
*a* – 50; *б* – 75; *в* – 100

На рис. 3 представлены результаты обработки полученных массивов данных – серия дифрактограмм многослойного покрытия CrAlYN/CrAlYO, полученная в процессе нагрева на воздухе и последующего охлаждения. Установлено, что в исходном состоянии в многослойном покрытии CrAlYN/CrAlYO регистрируются фазы карбида вольфрама (WC, подложка), металлического алюминия и фазы нитридов (CrN и AlN) и оксидов ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{AlYO}_3$ ) на основе хрома, алюминия и иттрия. В процессе нагрева образца с покрытием на воздухе

при температурах  $\sim 645$  °C исчезает рефлекс алюминия, а при температурах  $\sim 1020$  °C начинается интенсивное окисление и разрушение образца, образец изменяет геометрию, и дифракционная картина сначала сильно искажается при 1240 °C, а затем и вовсе пропадает при температуре 1300 °C. При последующем охлаждении до комнатной температуры дифракционная картина не восстанавливается. Таким образом, исследуемое многослойное покрытие CrAlYN/CrAlYO сохраняет термическую стойкость до температуры  $\sim 1020$  °C.



**Рис. 3.** Серия рентгеновских дифрактограмм многослойного покрытия CrAlYN/CrAlYO в процессе нагрева на воздухе до температуры 1300 °С и последующего охлаждения до комнатной температуры

**Fig. 3.** A series of X-ray diffraction patterns of the CrAlYN/CrAlYO multilayer coating during heating in air to a temperature of 1300 °C and subsequent cooling to room temperature

### Выводы

В ходе проведенных исследований установлено, что отрицательный потенциал смещения подложки (50, 75 и 100 В) оказывает значительное влияние на фазовый состав, параметры кристаллической структуры, толщину, шероховатость, морфологию поверхности и физико-механические свойства многослойных покрытий CrAlYN/CrAlYO. Фазы, находящиеся в преобладающем количественном содержании при увеличении потенциала смещения с 50 до 75 В изменялись следующим образом: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с 52 до 18% и CrN с 26 до 39%, что привело к наименьшим микронапряжениям для обеих фаз ( $\Delta d/d \times 10^{-3} = 1,9$ ). Установлено, что увеличение потенциала смещения с 50 до 100 В приводило к уменьшению толщины формируемого покрытия с 3,6 до 0,8 мкм и снижению шероховатости по критерию Rz с 0,433 до 0,310 мкм, что свидетельствовало об уменьшении капельной фазы, подтвержденной оптической микроскопией. Твердость покрытий при увеличении потенциала смещения с 50 до 100 В повышалась с 17,2 до 19,9 ГПа, а модуль упругости сначала снижался с 257,6 до 225,8 ГПа при увеличении  $U_{см}$  с 50 до 75 В, а затем повысился

до 280,6 ГПа при  $U_{см} = 100$  В. Таким образом, многослойное покрытие, полученное при  $U_{см} = 75$  В, обладало наилучшими физико-механическими свойствами, характеризующимися соотношениями  $H/E$  (0,08) и  $H^3/E^2$  (0,11), что коррелировало с результатами рентгеноструктурного анализа, где было показано, что данное покрытие обладало наименьшими микронапряжениями. Методом рентгенофазового анализа с использованием синхротронного излучения обнаружено, что полученные многослойные покрытия CrAlYN/CrAlYO сохраняют термическую стойкость в процессе нагрева на воздухе до температуры ~1020 °С.

### Благодарности / Acknowledgments

*Работа выполнена 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 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) within the framework of activity No. 3.1.18.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисова В. С., Солнцев С. С., Сольвьева Г. А., Малинина Г. А. Современное состояние исследований в области жаростойких ресурсных покрытий для никелевых и титановых сплавов // Труды ВИАМ. 2015. Т. 4. С. 10–16. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-2-2.
2. Леонов А. А., Абдульменова Е. В., Калашников М. П., Ли Ц. Влияние нановолокон  $Al_2O_3$  на уплотнение, фазовый состав и физико-механические свойства композитов на основе  $ZrO_2$ , полученных свободным вакуумным спеканием // Вопросы материаловедения. 2020. № 4 (104). С. 132–143. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-104-4-132-143.
3. Leonov A. A., Abdulmenova E. V., Kalashnikov M. P. Structure, phase composition, and mechanical properties of composites based on  $ZrO_2$  and multi-walled carbon nanotubes // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. V. 12. P. 482–490. DOI: 10.1134/S2075113321020313.
4. Leonov A. A., Dvilis E. S., Khasanov O. L., Paygin V. D., Kalashnikov M. P., Petukevich M. S., Panina A. A. Ceramic composite based on zirconia reinforced by single-walled carbon nanotubes // Nanotechnologies in Russia. 2019. V. 14. P. 118–124. DOI: 10.1134/S1995078019020095.
5. Donohue L. A., Smith I. J., Münz W.-D., Petrov I., Greene J. E. Microstructure and oxidation-resistance of  $Ti_{1-x-y-z}Al_xCr_yZn_zN$  layers grown by combined steered-arc/unbalanced-magnetron-sputter deposition // Surface and Coatings Technology. 1997. V. 94–95. P. 226–231. DOI: 10.1016/S0257-8972(97)00249-1.
6. Rovere F., Mayrhofer P. H. Impact of yttrium on structure and mechanical properties of Cr–Al–N thin films // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2007. V. 25. P. 1336–1340. DOI: 10.1116/1.2753842.
7. Denisov V. V., Denisova Y. A., Vardanyan E. L., Ostroverkhov E. V., Leonov A. A., Savchuk M. V. Deposition of a multilayer coating in a gas-metal beam-plasma formation at low pressure // Russian Physics Journal. 2021. V. 64. P. 145–150. DOI: 10.1007/s11182-021-02310-9.
8. Kolubaev A. V., Sizova O. V., Denisova Y. A., Leonov A. A., Teryukalova N. V., Novitskaya O. S., Byeli A. V. Structure and properties of CrN/TiN multilayer coatings produced by cathodic arc plasma deposition on copper and beryllium-copper alloy // Physical Mesomechanics. 2022. V. 25. P. 306–317. DOI: 10.1134/S102995992204004X.
9. Leonov A. A., Denisova Y. A., Denisov V. V., Syrtanov M. S., Shmakov A. N., Savostikov V. M., Teresov A. D. Structure and properties of CrN/TiN multilayer coatings obtained by vacuum-arc plasma-assisted deposition method // Coatings. 2023. V. 13, Iss. 2. Article number 351. DOI: 10.3390/coatings13020351.