



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Микроструктура и остаточные напряжения многослойных покрытий ZrN/CrN, полученных плазменно-ассистированным вакуумно-дуговым методом

Андрей Воронцов<sup>1, a\*</sup>, Андрей Филиппов<sup>1, b</sup>, Николай Шамарин<sup>1, c</sup>, Евгений Москвичев<sup>1, d</sup>,  
 Ольга Новицкая<sup>1, e</sup>, Евгений Княжев<sup>1, f</sup>, Юлия Денисова<sup>2, g</sup>, Андрей Леонов<sup>2, h</sup>, Владимир Денисов<sup>2, i</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия

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

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>, [vav@ispms.ru](mailto:vav@ispms.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0487-8382>, [andrey.v.filippov@yandex.ru](mailto:andrey.v.filippov@yandex.ru),  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4649-6465>, [shnn@ispms.ru](mailto:shnn@ispms.ru), <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>, [em\\_tsu@mail.ru](mailto:em_tsu@mail.ru),  
<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1043-4489>, [nos@ispms.tsc.ru](mailto:nos@ispms.tsc.ru), <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1984-9720>, [zhenya4825@gmail.com](mailto:zhenya4825@gmail.com),  
<sup>g</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3069-1434>, [yukolubaeva@mail.ru](mailto:yukolubaeva@mail.ru), <sup>h</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6645-3879>, [laa-91@yandex.ru](mailto:laa-91@yandex.ru),  
<sup>i</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5446-2337>, [volodyadenisov@yandex.ru](mailto:volodyadenisov@yandex.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.45.038.7

#### История статьи:

Поступила: 16 мая 2022

Рецензирование: 31 мая 2022

Принята к печати: 18 июня 2022

Доступно онлайн: 15 сентября 2022

#### Ключевые слова:

Покрытие  
 ПЭМ  
 Нитриды  
 Структура  
 Фазовый состав  
 РСА

#### Финансирование:

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 1.1.1.16.

#### Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Современное состояние в области применения твердых покрытий нуждается в формировании наноструктурированных композиций с использованием различных химических элементов. Современные твердые покрытия способны сочетать в себе разные свойства, такие как высокая твердость, износостойкость, коррозионная стойкость. В настоящее время перспективными являются покрытия, полученные послойным нанесением нитридов циркония и хрома. При осаждении комбинаций химических элементов на различные подложки требуются исследования, направленные на изучение их микроструктуры, и главным образом остаточных напряжений, сформированных при нанесении многослойных покрытий. **Целью работы** является исследование структурно-фазового состояния и остаточных напряжений покрытий системы ZrN/CrN, полученных плазменно-ассистированным вакуумно-дуговым методом из газовой фазы. **Методика исследования.** В работе исследованы образцы с покрытиями из нитридов циркония и хрома, нанесенными на подложки из твердого сплава ВК8. В работе используются такие методы исследований, как просвечивающая электронная микроскопия для изучения микроструктурных характеристик многослойных покрытий и рентгеноструктурный анализ для количественного определения остаточных напряжений I рода. **Результаты и их обсуждение.** На основании полученных экспериментальных результатов установлено, что изменение режимов нанесения многослойных покрытий ZrN/CrN в части скоростей вращения стола и подложкодержателя приводит к изменению микроструктуры, морфологии и внутренних напряжений поверхностных слоев многослойных покрытий. Показано, что при изменении условий нанесения слоев многослойного покрытия открываются возможности формирования покрытий ZrN/CrN на подложке из сплава ВК8 с наномасштабной толщиной слоев покрытия. Рентгеноструктурный анализ указывает в основном на несущественные напряжения, а при высокой скорости вращения стола и подложкодержателя – на высокие сжимающие напряжения во многослойном покрытии. В ходе исследований просвечивающей электронной микроскопии установлено, что покрытия CrN и ZrN имеют общую текстуру роста многослойного покрытия при низких скоростях вращения, а при высоких скоростях наблюдается текстурная разориентировка фаз слоев покрытия. На основе полученных результатов можно рекомендовать покрытия системы ZrN/CrN в качестве твердых покрытий.

**Для цитирования:** Микроструктура и остаточные напряжения многослойных покрытий ZrN/CrN, полученных плазменно-ассистированным вакуумно-дуговым методом / А.В. Воронцов, А.В. Филиппов, Н.Н. Шамарин, Е.Н. Москвичев, О.С. Новицкая, Е.О. Княжев, Ю.А. Денисова, А.А. Леонов, В.В. Денисов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 76–89. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-76-89.

#### \*Адрес для переписки

Воронцов Андрей Владимирович, к.т.н., м.н.с.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
 пр. Академический 2/4,  
 634055, г. Томск, Россия

Тел.: 8 (983) 239-34-17, e-mail: [vav@ispms.ru](mailto:vav@ispms.ru)

## Введение

Покрyтия из нитридов, такие как ZrN и CrN, имеют широкую область применения в качестве защитных покрyтий из-за их отличных механических, коррозионных характеристик, трибологических свойств [1, 2]. Покрyтие CrN благодаря хорошей стойкости к окислению [3], превосходной коррозионной стойкости, износостойкости [4] привлекает все большее внимание исследователей. Покрyтия нитрида хрома получают, например, методом осаждения из паровой фазы или методом электродугового ионного нанесения [2]. В свою очередь, покрyтия из нитрида циркония используются в авиастроении, обладают необходимой эрозийной и термической стойкостью, а также при изготовлении режущих инструментов [5]. Покрyтия ZrN исследуются в целях применения их в защитных покрyтиях в емкостях для хранения радиоактивных отходов, получения методом катодно-дугового напыления [6].

Кроме того, в научной литературе существует ряд комбинаций чередования материалов покрyтий металлических, аморфных или керамических. Подобный подход приводит к значительному росту эксплуатационных свойств покрyтия в целом. Так, в работе [7] проводились исследования влияния добавления компонента CrN при нанесении различных комбинаций многослойных покрyтий AlTiN/CrN/ZrN. Исследователи пришли к выводу, что добавление CrN с вариацией толщины слоя приводит к снижению остаточных напряжений и повышению износостойкости покрyтия. Осаждением из паровой фазы нанометровые слои CrN/ZrN и CrN/CrAlN наносились на подложку из нержавеющей стали для топливных элементов с протонообменной мембраной [8]. Отмечается превосходная коррозионная стойкость многослойных покрyтий CrN/ZrN в сравнении с CrN/CrAlN из-за итоговой высокой химической стабильности. С использованием различных условий при осаждении многослойных покрyтий ZrN/CrN методом вакуумно-дугового напыления изготавливались многослойные покрyтия с разной толщиной бислоя [9]. Выявлено, что уменьшение толщины слоев приводит к повышению твердости покрyтий, а также полученные покрyтия имели хорошие механические свойства. К тому же в работе

была выявлена концентрационная зависимость атомов азота на микротвердость и микроструктуру многослойных покрyтий. В итоге во множестве исследований, направленных на получение и использование покрyтий, в том числе многослойных, отмечается совершенствование механических характеристик, коррозионной стойкости, износостойкости [8, 10–15].

На основании представленной литературы, в настоящей работе проведены исследования многослойных покрyтий ZrN/CrN, нанесенных на подложку из сплава BK8. Используемый сплав предназначен для изготовления в первую очередь режущего инструмента и фрез. Основопологающим моментом в этой работе стало известное влияние на подложку в виде повышения трибологических свойств и повышение твердости, что в конечном счете влияет на продолжительность работы инструмента.

**Целью данной работы** является исследование методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурным анализом микроструктуры, текстуры роста многослойных покрyтий ZrN/CrN и остаточных напряжений первого рода многослойных покрyтий, полученных плазменно-ассистированным вакуумно-дуговым методом на подложку из сплава BK8, используемого для производства режущего инструмента и фрез. В комплексе с ранее полученными результатами [16] проведенные исследования позволяют сделать вывод о целесообразности применения данного метода получения многослойных покрyтий ZrN/CrN.

## Методика исследований

Для получения многослойных наноструктурированных покрyтий ZrN/CrN использовался плазменно-ассистированный вакуумно-дуговой метод. Схема получения покрyтий показана на рис. 1. Подложка 1 из сплава BK8 (8 % Co, 92 % WC) устанавливалась на держатель 2, который закреплен на столе 3, расположенном внутри вакуумной камеры 4. В процессе нанесения покрyтий осуществлялось вращение держателя в направлении, указанном стрелкой (позиция 5). Стол вращался в направлении, указанном стрелкой (позиция 6). Таким образом, осуществляется вращение образцов по планетарной схеме, что способствует формированию многослойных

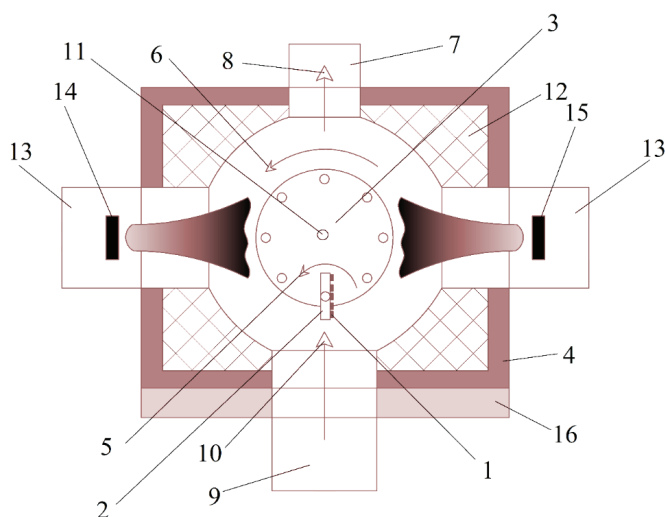


Рис. 1. Схема установки для нанесения многослойных наноструктурированных покрытий ZrN/CrN

Fig. 1. Scheme of the plant for a ZrN/CrN multilayer nanostructured coating deposition

покрытий. При этом скорость вращения держателя образца увеличивается прямо пропорционально относительно скорости вращения стола. До начала эксперимента вакуумная камера откачивается турбомолекулярным насосом 7. Направление откачки показано стрелкой (позиция 8). Подача нейтрального рабочего газа через плазменный источник 9 обеспечивает формирование рабочего давления в камере требуемого уровня. Направление подачи рабочего газа показано стрелкой (позиция 10).

При зажигании газового разряда с током 40 А и приложении напряжения смещения 700 В на подложкодержатель с образцами осуществлялся нагрев подложек до 400 °С. Контроль температуры осуществляется термопарой 11. Защита от нагрева элементов конструкции камеры выполнялась с помощью теплового экрана 12. После очистки поверхности объектов исследования ионной бомбардировкой и ее химической активации производился напуск смеси газов азота и аргона (90/10) до заданного давления и зажигание разрядов дуговых испарителей 13 с током 80 А для каждого из них. В каждом отдельно взятом испарителе было установлено по одному катоду из напыляемого материала (позиции 14 и 15), в нашем случае это были Zr (99,5 %) и Cr (99,9 %).

После нанесения покрытий открывается дверь 16 вакуумной камеры, извлекается держатель 2 с объектами исследований 1.

При нанесении многослойных покрытий варьировалась скорость вращения стола и соответственно скорость вращения подложкодержателя. Для эксперимента были выбраны три режима нанесения покрытий: скорость вращения стола 0,5 об/мин (образец ZrN/CrN-0,5), 3,5 об/мин (образец ZrN/CrN-3,5) и 8,0 об/мин (образец ZrN/CrN-8). Что соответствовало скорости вращения подложкодержателя в 20; 140; 320 оборотов в минуту соответственно.

Слои, нанесенные на подложку сплава ВК8, исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), рентгеноструктурным анализом (РСА) с использованием синхротронного излучения (работы произведены на СИ ВЭПП-3). ПЭМ проводился для оценки фазового состава, морфологии нанесенных покрытий, степени локальной разориентации слоев покрытия. Методом РСА проводились исследования для напряжений I рода, установления объемной доли фаз различных материалов покрытия CrN и ZrN. Длина волны при синхротронных исследованиях равнялась 1,540 598 Å. Для количественного определения макронапряжений в многослойных покрытиях использовалась методика  $\sin^2\psi$ . Предварительными данными для этого являются модуль упругости многослойных покрытий и коэффициент Пуассона. Данные о модуле упругости были получены в результате наноиндентирования в работе [16], и для образцов с многослойными покрытиями ZrN/CrN-0,5; ZrN/CrN-3,5 и ZrN/CrN-8 модуль упругости был равен 364, 359 и 436 ГПа соответственно. Коэффициент Пуассона взят из литературных данных [17, 18] и составил для слоев покрытия ZrN – 0,24, для слоев покрытия CrN – 0,28.

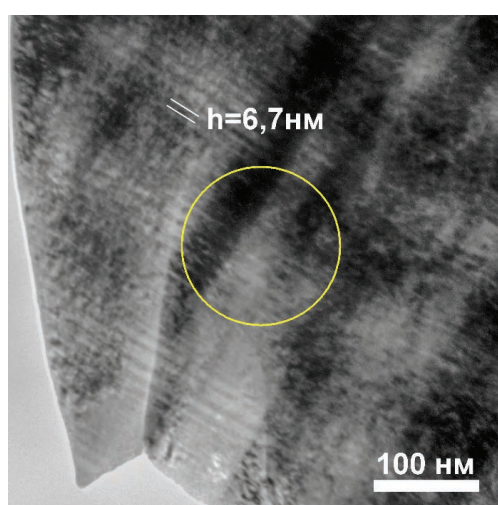
## Результаты и их обсуждение

В процессе исследований просвечивающей электронной микроскопией были выявлены морфологические, а также ориентационные различия в многослойных покрытиях в зависимости от скорости вращения стола установки нанесения покрытий и скорости вращения подложкодержателя. На рис. 2, а–в показаны светлопольные изображения многослойных покрытий ZrN/CrN-0,5; ZrN/CrN-3,5 и ZrN/CrN-8, полученных по режимам, отличающимся только скоростями

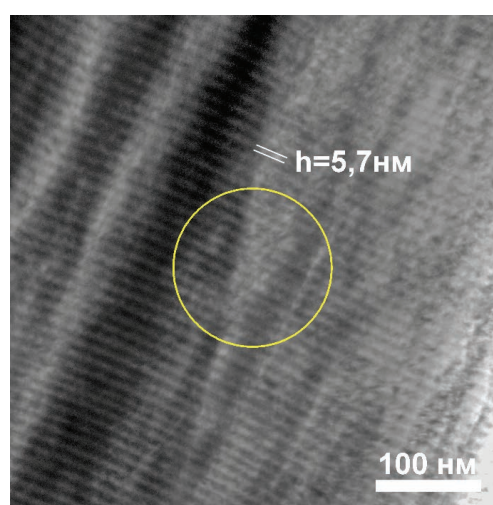


вращения стола и подложкодержателя. Как видно, многослойные покрытия ZrN/CrN состоят из чередующихся слоев нитридов. Однако в случае наименьшей скорости вращения стола и подложкодержателя, образец ZrN/CrN-0,5 (рис. 2, а), наблюдаются два типа чередования нитридов. Первый тип заключается в образовании наномасштабных слоев, как и в случае образцов ZrN/CrN-3,5; ZrN/CrN-8, образованных в процессе вращения подложкодержателя с одновременным вращением стола. Толщина наномасштабных слоев показана на рисунках с обозначением « $h$ ». С повышением скорости вращения стола

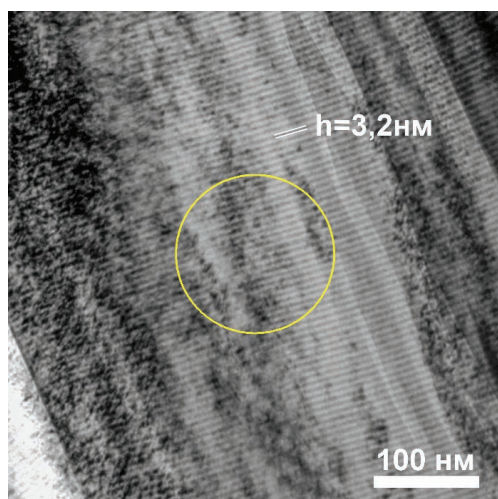
и подложкодержателя толщина слоев нитридов уменьшается. При этом если построить график зависимости скорости вращения подложкодержателя ( $V$ ) от полученной толщины наномасштабных слоев ( $h$ ), то можно предположить, что зависимость эта линейная, как показано на рис. 2, з. В данной работе мы пренебрегли скоростью вращения стола, так как скорость вращения подложкодержателя прямо пропорциональна скорости вращения стола. Уравнение прямой аппроксимации, показанной на рис. 2, з, предполагает, очевидно, пересечение с осью ординат в точке  $592 \pm 58$  об/мин, что должно



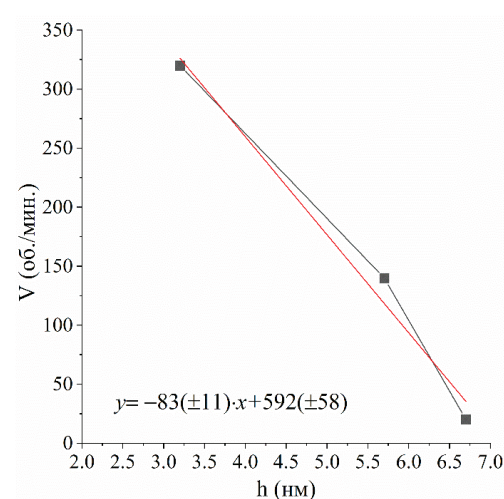
а



б



в



з

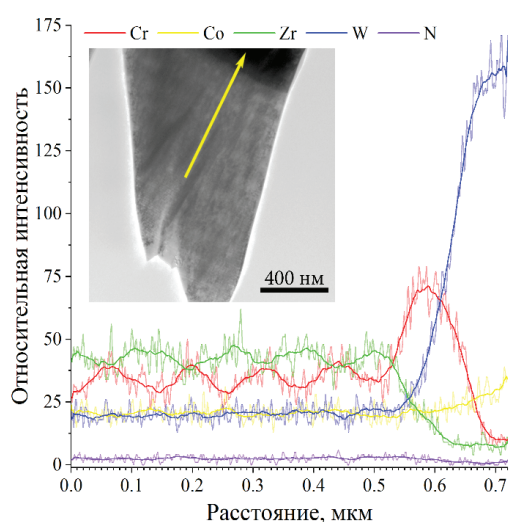
Рис. 2. Светлопольное изображение многослойного покрытия, произведенного по режимам ZrN/CrN-0,5 (а), ZrN/CrN-3,5 (б), ZrN/CrN-8 (в) и линейная аппроксимация зависимости скоростей вращения стола и подложкодержателя от толщины нанометровых слоев покрытия (з)

Fig. 2. Bright field image of multilayer coating formed at ZrN/CrN-0.5 (а), ZrN/CrN-3.5 (б), ZrN/CrN-8 (в) and linear approximation of the table and substrate holder rotation speeds as a function of the thickness of nanometer coating layers (з)

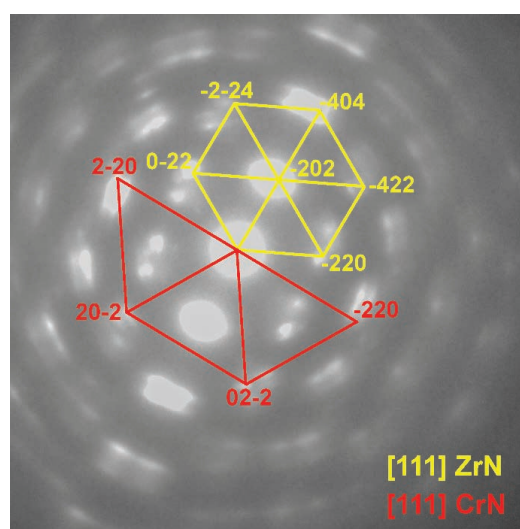
означать уменьшение толщины нитридных слоев до нуля, что в нашем случае показывает равные концентрации циркония и хрома по всей толщине покрытия без образования границ между нитридами. Причем это обстоятельство при соответствующих условиях может способствовать либо созданию тройного соединения системы ZrCrN, либо созданию аморфного слоя. Обсуждение этого будет изложено ниже в процессе дальнейших исследований ПЭМ.

Второй из упомянутых типов слоев – это субмикрометровые слои, которые наблюдаются только при наименьших скоростях враще-

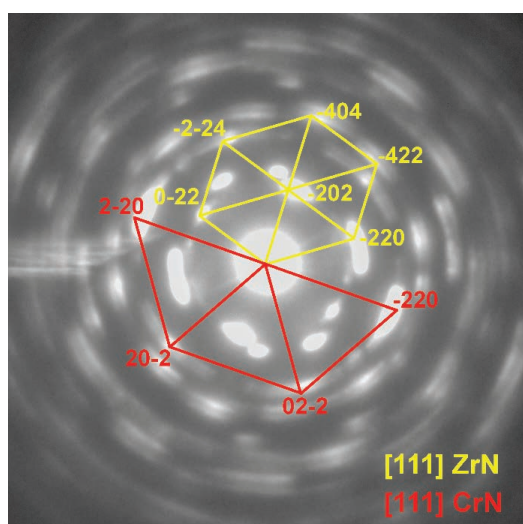
ния стола и подложкодержателя. Как можно увидеть из рис. 2, а, субмикрометровые слои состоят из описанных ранее наномасштабных чередующихся нитридных слоев. Во взаимосвязи со светлопольными изображениями ПЭМ проведен EDS-анализ многослойного покрытия ZrN/CrN-0,5, показанный на рис. 3, а. Анализ химического состава по траектории, указанной стрелкой на рис. 3, а, доказывает, что при скорости вращения стола 0,5 об/мин и скорости вращения подложкодержателя 20 об/мин создаются субмикрометровые слои толщиной  $120 \pm 8$  нм.



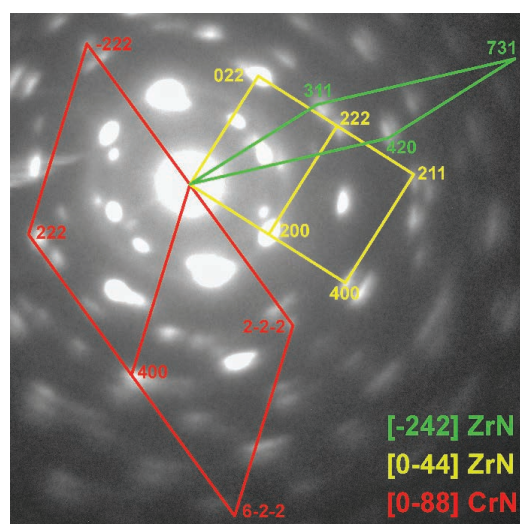
а



б



в



г

Рис. 3. Распределение химических элементов в многослойном покрытии ZrN/CrN-0,5 (а), микродифракционные картины многослойных покрытий, полученных по режимам ZrN/CrN-0,5 (б), ZrN/CrN-3,5 (в) и ZrN/CrN-8 (г)

Fig. 3. Chemical element distribution in ZrN/CrN-0.5 multilayer coating (a), micro diffraction patterns of multilayer coatings formed at ZrN/CrN-0.5 (б), ZrN/CrN-3.5 (в) and ZrN/CrN-8 (г)



Анализ фазового состава многослойных покрытий ZrN/CrN показал наличие кристаллических решеток как нитрида циркония, так и нитрида хрома. Однако как и при анализе светлопольных изображений, при расшифровке микродифракционных картин, полученных с SAED (Selected area diffraction), указанных на рис. 2, *а–в* окружностями, существуют отличительные особенности. В первую очередь это касается ориентации роста кристаллитов слоев многослойного покрытия. В случае образцов ZrN/CrN-0,5; ZrN/CrN-3,5 (рис. 3, *а, б*) наблюдается только одна общая ось зоны [111] как для рефлексов обратной решетки нитрида циркония, так и для рефлексов обратной решетки нитрида хрома. В случае же с наибольшими скоростями вращения стола и подложкодержателя образца ZrN/CrN-8 (рис. 3, *в*) были выявлены две основные оси зон: [0-11] как для слоев многослойного покрытия ZrN, так и для CrN, и ось зоны [-121] только для фазы ZrN. Во всех случаях есть предпочтительная общая ориентация роста для фаз ZrN и CrN, но при увеличении скорости вращения стола и подложкодержателя при нанесении покрытий происходит некоторый поворот общей оси роста, а также разориентация слоев одной фазы (в данном случае). При этом азимутальная разориентировка обратных решеток обеих фаз в большей степени наблюдается при меньших скоростях вращения стола и подложкодержателя (образцы ZrN/CrN-0,5 и ZrN/CrN-3,5). В этих образцах азимутальная разориентировка составила до 18°, в образце ZrN/CrN-8 она не превышает 6° (рис. 3, *б–в*).

После установления микроструктурных характеристик при анализе ПЭМ установлены характерные различия в зависимости от скоростей вращения стола и подложкодержателя. Для практического применения одной из основных характеристик покрытий, влияющих на продолжительность рабочего времени, являются остаточные напряжения. После нахождения модуля упругости [16] многослойного покрытия и коэффициента Пуассона [17, 18] по методике  $\sin^2\Psi$  с использованием синхротронного излучения количественно определили величину напряжений I рода в многослойных покрытиях.

Для количественного определения величины напряжений в многослойных покрытиях в про-

цессе синхротронных исследований была взята формула [19]

$$\sigma_x = -\frac{E}{2(1 + \nu_{МП})} \operatorname{ctg} \Theta_0 \times \\ \times \frac{\partial(2\Theta_{\Psi_x})}{\partial(\sin^2 \Psi)} \frac{\pi}{180} \text{ [МПа]}, \quad (1)$$

где  $E$  – эффективный модуль упругости многослойного покрытия, определенный в процессе наноиндентирования;  $\nu_{МП}$  – коэффициент Пуассона многослойного покрытия;  $\Theta_0$  – угол дифракции мономатического синхротронного излучения для материала в ненапряженном состоянии;  $\Theta_{\Psi_x}$  – угол дифракции мономатического синхротронного излучения для характерных плоскостей отражения, перпендикулярных направлению ( $\Psi$ ) падающего пучка мономатического синхротронного. По формуле (1) определяется величина напряжений в многослойных покрытиях в плоскости поверхности экспериментального образца.

Первым этапом при исследованиях напряжений многослойного покрытия было получение первичных рентгенограмм с фокусировкой по Брэггу–Брентано.

Симметричная схема съемки производилась для определения положения углов  $2\Theta_0$  для идентификации присутствующих фаз. На рис. 4 представлена рентгенограмма, произведенная с использованием синхротронного излучения полученных образцов с многослойными покрытиями ZrN/CrN. Для расчета напряжений были выбраны рефлекс (200) ГЦК-решетки компонента покрытия CrN и рефлекс (222) ГЦК-решетки компонента покрытия ZrN, обозначенные на рис. 4. Выбор рефлексов был связан как лучшей идентификацией, так и с уменьшением погрешности измерения величины напряжений. Сложностью при этом служило еще наличие рефлексов от карбида вольфрама (подложки), на рис. 4 они присутствуют в виде узких рентгеновских линий.

Из полученных рентгенограмм (рис. 4) наблюдается непостоянство текстурной составляющей многослойных покрытий. Рефлекс (220) фазы ZrN, расположенный на  $56,7^\circ 2\Theta$ , очень слабый при наименьшей скорости вращения стола и подложкодержателя, при увеличении скоростей вращения интенсивность рефлекса

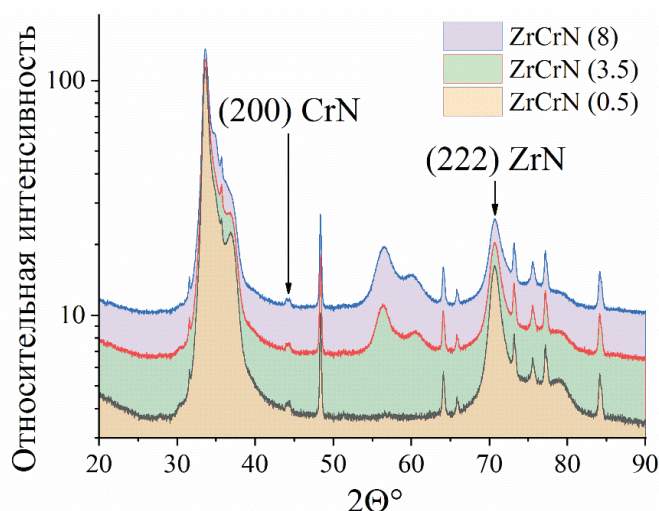


Рис. 4. Рентгенограммы полученных образцов с многослойными покрытиями ZrN/CrN, произведенные методом симметричной съемки (фокусировка по Брэггу-Брентано) с обозначением рефлексов, подлежащих дальнейшей серии асимметричных съемок для определения напряжений методом  $\sin^2\Psi$

Fig. 4. X-ray diagrams of the formed ZrN/CrN multilayer coated samples obtained by symmetrical imaging (Bragg-Brentano focusing) with marking of peaks subjected to further series of asymmetrical imaging to determine stresses by  $\sin^2\Psi$  method

возрастает. В связи с этими обстоятельствами кристаллиты, в данном случае фазы ZrN, имеют поликристаллическую структуру или большие разориентировки слоев относительно направления роста покрытия только при больших скоростях вращения стола и подложкодержателя.

После идентификации анализируемых рефлексов фаз ZrN и CrN производилась серия асимметричных съемок, угол  $\Psi$  при этом был равен  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ . На рис. 5 проиллюстрирована серия асимметричных съемок для рефлекса (222) фазы ZrN образца ZrN/CrN-0,5. Красным цветом выделена область углового положения анализируемого рефлекса.

После установления положения рефлексов полученные точки представили в виде зависимости в координатах  $2\Theta_{\Psi x} - \sin^2\Psi$  и аппроксимировали линейной функцией. Вид зависимости показан на рис. 6.

При этом расчет напряжений  $\sigma_x$  можно представить в виде формулы

$$\sigma_x = MK \text{ [МПа]}, \quad (2)$$

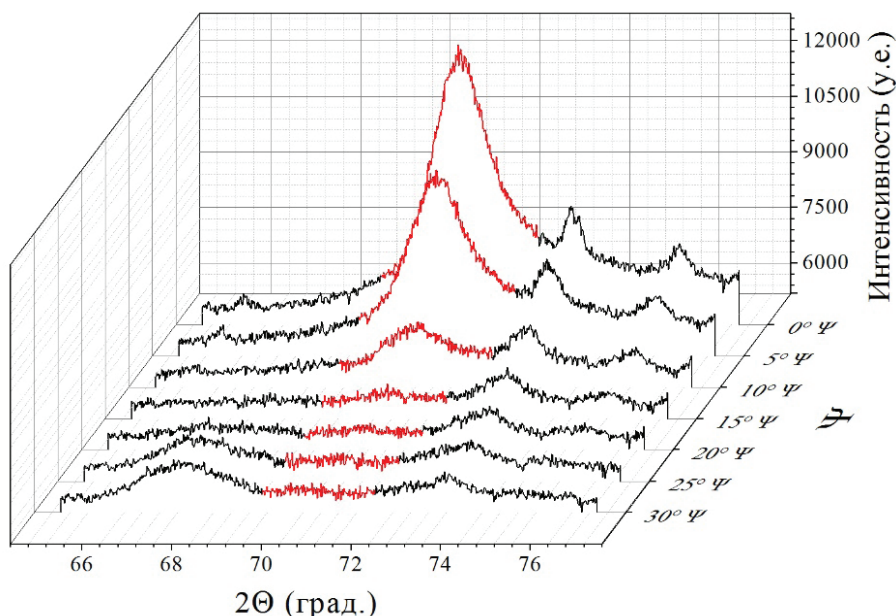


Рис. 5. Серия несимметричных съемок с использованием синхротронного излучения в диапазоне угла  $2\Theta$   $65^\circ - 77^\circ$  для рефлекса (222) фазы ZrN образца ZrN/CrN-0,5 с вариацией угла  $\Psi$  от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . Красным цветом выделен угловой диапазон анализируемого рефлекса

Fig. 5. Series of asymmetric synchrotron radiation surveys in the range of  $2\Theta$   $65^\circ - 77^\circ$  for the ZrN phase peak (222) of sample ZrN/CrN-0.5 with a variation of angle  $\Psi$  from  $0^\circ$  to  $30^\circ$  with a step of  $5^\circ$ . The angular range of the analyzed peak is highlighted in red

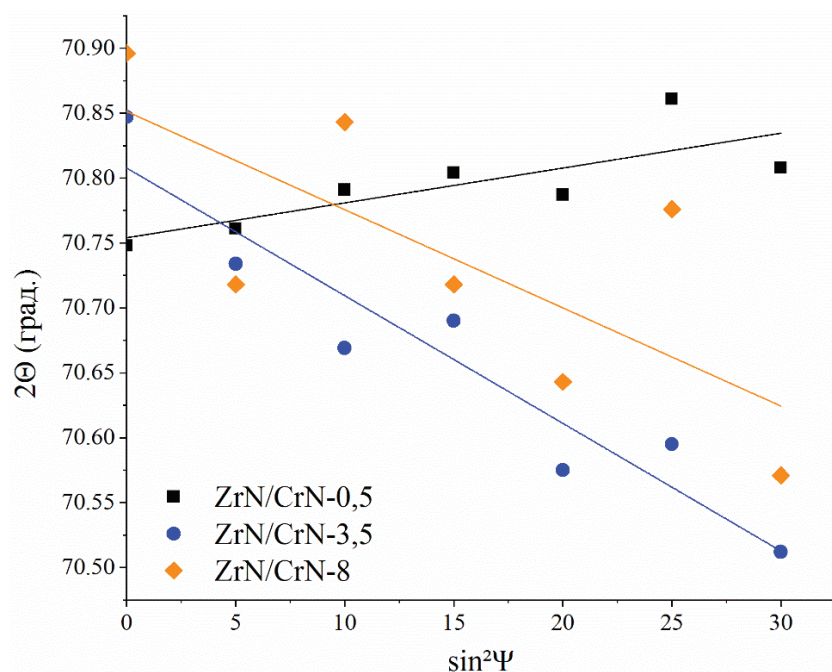


Рис. 6. Линейная зависимость положения дифракционного максимума (222) фазы ZrN от  $\sin^2\Psi$  для образцов многослойных покрытий, нанесенных с разной скоростью вращения стола и подложкодержателя

Fig. 6. Linear dependence of diffraction maximum position (222) of ZrN phase on  $\sin^2\Psi$  for samples of multilayer coatings deposited at different rotational speeds of table and substrate holder

где

$$M = -\frac{E}{2(1 + \nu_{МП})} \times \operatorname{ctg}\Theta_0 \frac{\pi}{180} \text{ [МПа / град]}, \quad (3)$$

$$K_{\Delta} = \frac{\partial(2\Theta_{\Psi x})}{\partial(\sin^2\Psi)} \text{ [град]}. \quad (4)$$

Соответственно для количественных расчетов величины напряжений в многослойных покрытиях в процессе синхротронных исследований угол  $\Theta_0$  для ненапряженного состояния материала необходимо брать исходя из графика зависимости  $2\Theta_{\Psi x} - \sin^2\Psi$ , откуда  $2\Theta_0$  – это экстраполяционное значение линейной аппроксимации зависимости  $2\Theta_{\Psi x} - \sin^2\Psi$  [20]. Коэффициент  $K_{\Delta}$  находится по наклону аппроксимированной прямой зависимости  $2\Theta_{\Psi x} - \sin^2\Psi$ , как показано в уравнении (4).

Коэффициент напряжения  $M$  рассчитывался по формуле (3) с использованием полученных значений  $\nu_{МП}$ ,  $E$ ,  $\Theta_0$ . По формуле (2) количественно определили величину напряжений в многослойных покрытиях ZrN/CrN в процессе синхротронных исследований. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Аналогично предыдущим шагам произведен расчет остаточных напряжений для фазы CrN по угловому положению рефлекса (200). Серия несимметричных съемок для рефлекса (200) фазы CrN, имеющего угловое положение  $2\Theta 44^\circ$ , представлена на рис. 7.

Угловые положения рефлекса (200) при асимметричной съемке фазы CrN представлены на рис. 8 в виде зависимости  $2\Theta_{\Psi x} - \sin^2\Psi$ .

Таблица 1

Table 1

Расчетные величины для определения величины остаточных напряжений и результат расчета остаточных напряжений в плоскости поверхности образцов многослойных покрытий для фазы ZrN  
Calculated values for determining the residual stresses and the result of calculating the residual stresses in the plane of the surface of the multilayer coating samples for the ZrN phase

Образец / Sample	$2\Theta_0$ , град / $2\Theta_0$ , degree	Коэффициент $M$ , МПа/град / Coefficient $M$ , MPa/degree	Коэффициент $K$ , град / Coefficient $K$ , degree	Остаточные напряжения, МПа / Residual stresses, MPa
ZrN/CrN-0,5	$70,754 \pm 0,017$	$-2,393 \times 10^3$	$0,003 \pm 0,001$	$-6,437$
ZrN/CrN-3,5	$70,808 \pm 0,026$	$-2,235 \times 10^3$	$-0,010 \pm 0,001$	$22,000$
ZrN/CrN-8	$70,851 \pm 0,057$	$-2,599 \times 10^3$	$-0,008 \pm 0,003$	$19,65$



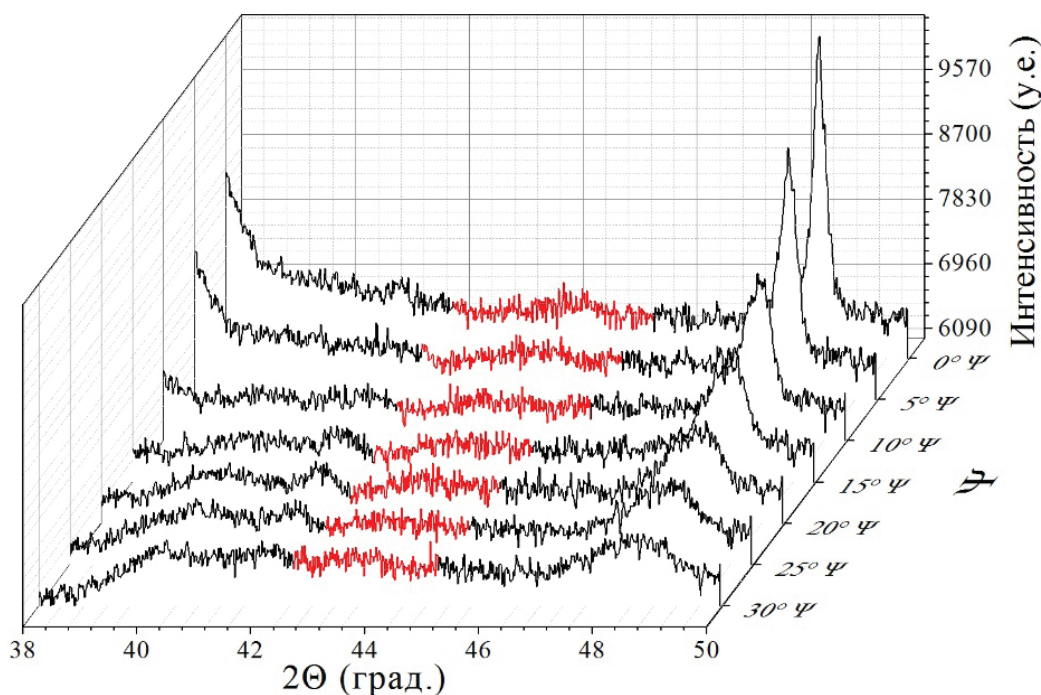


Рис. 7. Серия несимметричных съемок с использованием синхротронного излучения в диапазоне угла  $2\Theta$   $38^\circ - 50^\circ$  для рефлекса (200) фазы CrN с вариацией угла  $\Psi$  от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  с шагом  $5^\circ$

Fig. 7. Series of asymmetric surveys using synchrotron radiation in the range of angle  $2\Theta$   $38^\circ - 50^\circ$  for the peak (200) of the CrN phase with a variation of angle  $\Psi$  from  $0^\circ$  to  $30^\circ$  with a step of  $5^\circ$

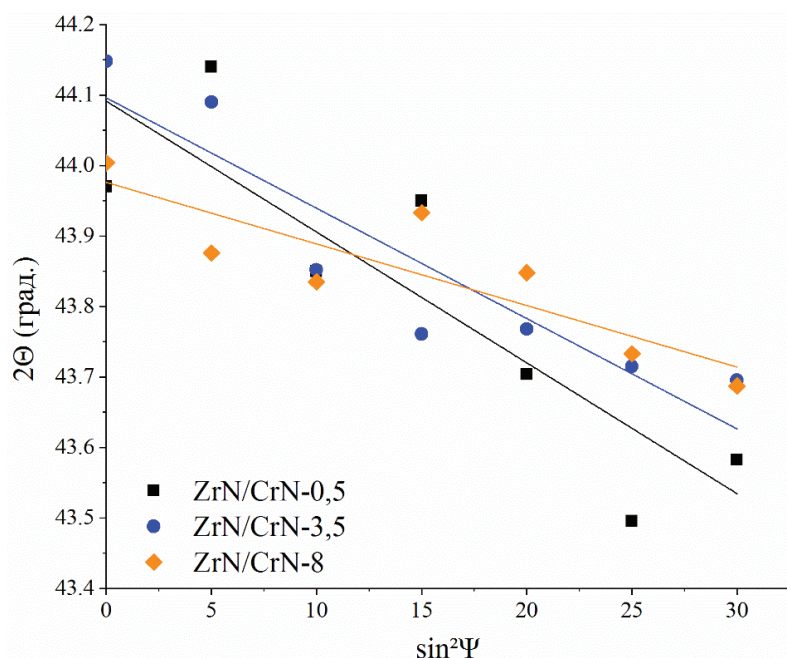


Рис. 8. Линейная зависимость положения дифракционного максимума (200) фазы CrN от  $\sin^2\Psi$  для образцов многослойных покрытий, нанесенных с разной скоростью вращения стола и подложкодержателя

Fig. 8. Linear dependence of diffraction maximum position (200) of CrN phase on  $\sin^2\Psi$  for multilayer coating samples deposited at different table and substrate rotation speeds

В итоге полученные величины, используемые для расчета внутренних напряжений, а также сама величина внутренних напряжений представлены в табл. 2.

Серии асимметричных съемок, представленные на рис. 4 и 6, показаны как пример серии съемок. Особенностью является тот факт, что в целом многослойные покрытия, полученные плазменно-ассистированным вакуумно-дуговым методом, имеют низкие напряжения. Напряжения первого рода имеют положительный знак или незначительны кроме образца ZrN/CrN-8, а именно фазы CrN. В этом случае величина остаточных напряжений составила более  $-8$  ГПа, отрицательное значение указывает на присутствие сжимающих остаточных напряжений. Принимая во внимание результаты исследований ПЭМ, можно сделать вывод, что увеличение скорости вращения стола и подложкодержателя во время получения многослойных

**Результаты количественного определения величины напряжений в плоскости поверхности образцов многослойных покрытий для фазы CrN в процессе синхротронных исследований**

**Results of quantitative determination of stress values in in the plane of the surface of the multilayer coating samples for the CrN phase during synchrotron studies**

Образец / Sample	$2\Theta_0$ , град / $2\Theta_0$ , degree	Коэффициент $M$ , МПа/град / Coefficient $M$ , MPa/degree	Коэффициент $K$ , град / Coefficient $K$ , degree	Остаточные напряжения, МПа / Residual stresses, MPa
ZrN/CrN-0,5	$44,092 \pm 0,084$	$-4,520 \times 10^3$	$-0,019 \pm 0,005$	839
ZrN/CrN-3,5	$44,096 \pm 0,053$	$-4,301 \times 10^3$	$-0,016 \pm 0,003$	674
ZrN/CrN-8	$43,976 \pm 0,041$	$9,441 \times 10^5$	$-0,009 \pm 0,002$	-8251

покрытий сопровождается переориентированием слоев многослойного покрытия относительно направления нанесения покрытия, увеличением твердости и модуля упругости многослойного покрытия [16] и наличием сжимающих остаточных напряжений. Хотя установленные факты микроструктурных характеристик, текстурной составляющей и величины остаточных напряжений интегрально указывают на положительное влияние увеличения скорости вращения стола и подложкодержателя при получении многослойного покрытия, остаются вопросы, связанные с дальнейшими исследованиями, которые определяют рамки применения технологии получения многослойных покрытий с высокими скоростями взаимного вращения стола и подложкодержателя в процессе нанесения покрытий.

### Выводы

Проведены исследования многослойных покрытий ZrCrN, полученных плазменно-ассистированным вакуумно-дуговым методом. Показано, что скорости вращения стола и подложкодержателя в значительной степени влияют на микроструктурные характеристики при нанесении многослойных покрытий ZrCrN. По результатам анализа ПЭМ и PCA можно сделать следующие выводы.

Кристаллиты ГЦК фаз ZrN и CrN при меньших скоростях вращения стола и подложкодержателя растут в общем направлении с разориентировкой, предположительно между слоями, до 18 градусов, при повышении скоростей вра-

щения стола и подложкодержателя наблюдается бимодальное распределение текстурной составляющей фазы ZrN;

Толщина чередующихся слоев ZrN и CrN в многослойных покрытиях уменьшается при увеличении скоростей вращения стола и подложкодержателя, причем тенденция на этом диапазоне скоростей вращения имеет линейный характер.

В результате PCA установлено, что внутренние остаточные напряжения в многослойных покрытиях в образцах ZrN/CrN-0,5 и ZrN/CrN-3,5 незначительны, в то время как образец ZrN/CrN-8, полученный при наибольшей скорости вращения, имеет сжимающие остаточные напряжения I рода.

### Список литературы

1. Fatigue properties of a 316L stainless steel coated with different ZrN deposits / J.A. Berríos-Ortiz, J.G. La Barbera-Sosa, D.G. Teer, E.S. Puchi-Cabrera // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 179. – P. 145–157. – DOI: 10.1016/S0257-8972(03)00808-9.
2. Structural and mechanical properties of compositionally gradient CrNx coatings prepared by arc ion plating / M. Zhang, M.K. Li, K.H. Kim, F. Pan // Applied Surface Science. – 2009. – Vol. 255. – P. 9200–9205. – DOI: 10.1016/J.APSUSC.2009.07.002.
3. High-temperature oxidation resistant (Cr, Al) N films synthesized using pulsed bias arc ion plating / M. Zhang, G. Lin, G. Lu, C. Dong, K.H. Kim // Applied Surface Science. – 2008. – Vol. 254. – P. 7149–7154. – DOI: 10.1016/J.APSUSC.2008.05.293.
4. Structure and corrosion properties of PVD Cr–N coatings / C. Liu, Q. Bi, H. Ziegele, A. Leyland, A. Matthews // Journal of Vacuum Science and

- Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2002. – Vol. 20. – P. 772–780. – DOI: 10.1116/1.1468651.
5. Adhesion improvements in silicon carbide deposited by plasma enhanced chemical vapour deposition / V.A. Mernagh, T.C. Kelly, M. Ahern, A.D. Kennedy, A.P.M. Adriaansen, P.P.J. Ramaekers, L. McDonnell, R. Koekoek // *Metallurgical Coatings and Thin Films*. – 1991. – Vol. P. 462–467. – DOI: 10.1016/B978-0-444-89455-7.50087-3.
6. Characterization of zirconium nitride coatings deposited by cathodic arc sputtering / K.A. Gruss, T. Zheleva, R.F. Davis, T.R. Watkins // *Surface and Coatings Technology*. – 1998. – Vol. 107. – P. 115–124. – DOI: 10.1016/S0257-8972(98)00584-2.
7. *Chang Y.Y., Chang B.Y., Chen C.S.* Effect of CrN addition on the mechanical and tribological performances of multilayered AlTiN/CrN/ZrN hard coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – Vol. 433. – P. 128107. – DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2022.128107.
8. Nanometric CrN/CrAlN and CrN/ZrN multilayer physical vapor deposited coatings on 316L stainless steel as bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells / T. Rajabi, M. Atapour, H. Elmkhah, S.M. Nahvi // *Thin Solid Films*. – 2022. – Vol. 753. – P. 139288. – DOI: 10.1016/J.TSF.2022.139288.
9. The influence of deposition conditions and bilayer thickness on physical-mechanical properties of CA-PVD multilayer ZrN/CrN coatings / O. Maksakova, S. Simões, A. Pogrebniak, O. Bondar, Y. Kravchenko, V. Beresnev, N. Erdybaeva // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 140. – P. 189–196. – DOI: 10.1016/J.MATCHAR.2018.03.048.
10. Enhancing mechanical and tribological performance of multilayered CrN/ZrN coatings / J.J. Zhang, M.X. Wang, J. Yang, Q.X. Liu, D.J. Li // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. – Vol. 201. – P. 5186–5189. – DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2006.07.093.
11. Mechanical and tribological properties evaluation of cathodic arc deposited CrN/ZrN multilayer coatings / S.H. Huang, S.F. Chen, Y.C. Kuo, C.J. Wang, J.W. Lee, Y.C. Chan, H.W. Chen, J.G. Duh, T.E. Hsieh // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – Vol. 206, iss. 7. – P. 1744–1752. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.10.029.
12. Microstructures and tribological properties of CrN/ZrN nanoscale multilayer coatings / Z.G. Zhang, O. Rapaud, N. Allain, D. Mercs, M. Baraket, C. Dong, C. Coddet // *Applied Surface Science*. – 2009. – Vol. 255, iss. 7. – P. 4020–4026. – DOI: 10.1016/j.apusc.2008.10.075.
13. Thick CrN/NbN multilayer coating deposited by cathodic arc technique / J.A. Araujo, R.M. Souza, N.B. De Lima, A.P. Tschiptschin // *Materials Research*. – 2017. – Vol. 20. – P. 200–209. – DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2016-0293.
14. A comparative study of reactive direct current magnetron sputtered CrAlN and CrN coatings / H.C. Barshilia, N. Selvakumar, B. Deepthi, K.S. Rajam // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 201. – P. 2193–2201. – DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2006.03.037.
15. Corrosion and interfacial contact resistance of 316L stainless steel coated with magnetron sputtered ZrN and TiN in the simulated cathodic environment of a proton-exchange membrane fuel cell / P. Yi, L. Zhu, C. Dong, K. Xiao // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 363. – P. 198–202. – DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2019.02.027.
16. Исследование структурно-фазового состояния и механических свойств покрытий ZrCrN, полученных вакуумно-дуговым методом / А.В. Филиппов, Н.Н. Шамарин, Е.Н. Москвичев, О.С. Новицкая, Е.О. Княжев, Ю.А. Денисова, А.А. Леонов, В.В. Денисов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 87–102. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-87-102.
17. *Sue J.A., Perry A.J., Vetter J.* Young's modulus and stress of CrN deposited by cathodic vacuum arc evaporation // *Surface and Coatings Technology*. – 1994. – Vol. 68–69. – P. 126–130. – DOI: 10.1016/0257-8972(94)90149-X.
18. *Meenaatci A.T.A., Rajeswarapalanichamy R., Iyakutti K.* Pressure induced phase transition of ZrN and HfN: a first principles study // *Journal of Atomic and Molecular Sciences*. – 2013. – Vol. 4, N 4. – P. 321–335. – DOI: 10.4208/jams.121012.012013a.
19. *Chimmat M., Srinivasan D.* Understanding the residual stress in DMLS CoCrMo and SS316L using X-ray diffraction // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol. 14. – P. 746–757. – DOI: 10.1016/J.PROSTR.2019.05.093.
20. *Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А.* Рентгенографический и электроннооптический анализ. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Металлургия, 1970. – 366 с.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)





## Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Microstructure and residual stresses of ZrN/CrN multilayer coatings formed by the plasma-assisted vacuum-arc method

Andrey Vorontsov<sup>1,a</sup>, Andrey Filippov<sup>1,b,\*</sup>, Nikolay Shamarin<sup>1,c</sup>, Evgenij Moskvichev<sup>1,d</sup>, Ol'ga Novitskaya<sup>1,e</sup>,  
 Evgenii Knyazhev<sup>1,f</sup>, Yuliya Denisova<sup>2,g</sup>, Andrei Leonov<sup>2,h</sup>, Vladimir Denisov<sup>2,i</sup>

<sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS, 2/4 per. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3 per. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>,  [vav@ispms.ru](mailto:vav@ispms.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0487-8382>,  [andrey.v.filippov@yandex.ru](mailto:andrey.v.filippov@yandex.ru),  
<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4649-6465>,  [shnn@ispms.ru](mailto:shnn@ispms.ru), <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>,  [em\\_tsu@mail.ru](mailto:em_tsu@mail.ru),  
<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-1043-4489>,  [nos@ispms.tsc.ru](mailto:nos@ispms.tsc.ru), <sup>f</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1984-9720>,  [zhenya4825@gmail.com](mailto:zhenya4825@gmail.com),  
<sup>g</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-3069-1434>,  [yukolubaeva@mail.ru](mailto:yukolubaeva@mail.ru), <sup>h</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6645-3879>,  [laa-91@yandex.ru](mailto:laa-91@yandex.ru),  
<sup>i</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-5446-2337>,  [volodyadenisov@yandex.ru](mailto:volodyadenisov@yandex.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 16 May 2022

Revised: 31 May 2022

Accepted: 18 June 2022

Available online: 15 September 2022

##### Keywords:

Coating

TEM investigation

Nitrides

X-Ray analysis

Phase composition

##### Funding

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 event No. 1.1.16.

##### Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

#### ABSTRACT

**Introduction.** The current state of the art in the field of hard coatings application requires the formation of nanostructured compositions using different chemical elements. Modern hard coatings are able to combine different properties such as high hardness, wear resistance, corrosion resistance. At present, coatings formed by layer-by-layer deposition of zirconium and chromium nitrides are promising. When depositing combinations of chemical elements on various substrates, studies are required aimed at investigating its microstructure and, mainly, residual stresses formed during the deposition of multilayer coatings. **The purpose of this work** is to investigate the structural-phase state and residual stresses of ZrN/CrN system coatings formed by plasma-assisted vacuum-arc method from the gas phase. **Research methods.** Samples with coatings of zirconium and chromium nitrides deposited on substrates of hard alloy VK8 are investigated. Transmission electron microscopy is used to study the microstructural characteristics of multilayered coatings and X-ray diffraction analysis is used to quantify macroscopic stresses. **Results and discussion.** Based on the experimental results obtained it is found that changing the modes of deposition of multilayer ZrN/CrN coatings with regard to rotation speeds of table and substrate holder leads to variations in microstructure, morphology and internal stresses of surface layers of multilayer coatings. It is shown that by changing conditions for the multilayer coating deposition the possibilities of forming ZrN/CrN coatings on the substrate made of VK8 alloy with nanoscale thickness of coating layers open up. X-ray diffraction analysis indicates mainly insignificant stresses, and at high table and substrate rotation speeds – high compressive stresses in the multilayer coating. Transmission electron microscopy revealed that CrN and ZrN coatings have a common multilayer coating growth texture at low rotation speeds, and at high speeds a textural misorientation of the phases of the coating layers is observed. Based on the results obtained it is possible to recommend coatings of ZrN/CrN system as hard coatings.

**For citation:** Vorontsov A.V., Filippov A.V., Shamarin N.N., Moskvichev E.N., Novitskaya O.S., Knyazhev E.O., Denisova Yu.A., Leonov A.A., Denisov V.V. Microstructure and residual stresses of ZrN/CrN multilayer coatings formed by the plasma-assisted vacuum-arc method. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 76–89. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-76-89. (In Russian).

#### \* Corresponding author

Vorontsov Andrey V., Ph.D. (Engineering), Research assistant  
 Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,  
 2/4 per. Akademicheskii,  
 634055, Tomsk, Russian Federation  
**Tel.:** 8 (983) 239-34-17, **e-mail:** [vav@ispms.ru](mailto:vav@ispms.ru)

## References

1. Berríos-Ortiz J.A., La Barbera-Sosa J.G., Teer D.G., Puchi-Cabrera E.S. Fatigue properties of a 316L stainless steel coated with different ZrN deposits. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 179, pp. 145–157. DOI: 10.1016/S0257-8972(03)00808-9.
2. Zhang M., Li M.K., Kim K.H., Pan F. Structural and mechanical properties of compositionally gradient CrN<sub>x</sub> coatings prepared by arc ion plating. *Applied Surface Science*, 2009, vol. 255, pp. 9200–9205. DOI: 10.1016/J.APSUSC.2009.07.002.
3. Zhang M., Lin G., Lu G., Dong C., Kim K.H. High-temperature oxidation resistant (Cr, Al)N films synthesized using pulsed bias arc ion plating. *Applied Surface Science*, 2008, vol. 254, pp. 7149–7154. DOI: 10.1016/J.APSUSC.2008.05.293.
4. Liu C., Bi Q., Ziegele H., Leyland A., Matthews A. Structure and corrosion properties of PVD Cr–N coatings. *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2002, vol. 20, pp. 772–780. DOI: 10.1116/1.1468651.
5. Mernagh V.A., Kelly T.C., Ahern M., Kennedy A.D., Adriaansen A.P.M., Ramaekers P.P.J., McDonnell L., Koekoek R. Adhesion improvements in silicon carbide deposited by plasma enhanced chemical vapour deposition. *Metallurgical Coatings and Thin Films*, 1991, vol. 1, pp. 462–467. DOI: 10.1016/B978-0-444-89455-7.50087-3.
6. Gruss K.A., Zheleva T., Davis R.F., Watkins T.R. Characterization of zirconium nitride coatings deposited by cathodic arc sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 1998, vol. 107, pp. 115–124. DOI: 10.1016/S0257-8972(98)00584-2.
7. Chang Y.Y., Chang B.Y., Chen C.S. Effect of CrN addition on the mechanical and tribological performances of multilayered AlTiN/CrN/ZrN hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 433, pp. 128107. DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2022.128107.
8. Rajabi T., Atapour M., Elmkhah H., Nahvi S.M. Nanometric CrN/CrAlN and CrN/ZrN multilayer physical vapor deposited coatings on 316L stainless steel as bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells. *Thin Solid Films*, 2022, vol. 753, p. 139288. DOI: 10.1016/J.TSF.2022.139288.
9. Maksakova O., Simoães S., Pogrebniak A., Bondar O., Kravchenko Y., Beresnev V., Erdybaeva N. The influence of deposition conditions and bilayer thickness on physical-mechanical properties of CA-PVD multilayer ZrN/CrN coatings. *Materials Characterization*, 2018, vol. 140, pp. 189–196. DOI: 10.1016/J.MATCHAR.2018.03.048.
10. Zhang J.J., Wang M.X., Yang J., Liu Q.X., Li D.J. Enhancing mechanical and tribological performance of multilayered CrN/ZrN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, pp. 5186–5189. DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2006.07.093.
11. Huang S.H., Chen S.F., Kuo Y.C., Wang C.J., Lee J.W., Chan Y.C., Chen H.W., Duh J.G., Hsieh T.E. Mechanical and tribological properties evaluation of cathodic arc deposited CrN/ZrN multilayer coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 206, iss. 7, pp. 1744–1752. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.10.029.
12. Zhang Z.G., Rapaud O., Allain N., Mercs D., Baraket M., Dong C., Coddet C. Microstructures and tribological properties of CrN/ZrN nanoscale multilayer coatings. *Applied Surface Science*, 2009, vol. 255, iss. 7, pp. 4020–4026. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.10.075.
13. J.A., Souza R.M., De Lima N.B., Tschiptschin A.P. Thick CrN/NbN multilayer coating deposited by cathodic arc technique. *Materials Research*, 2017, vol. 20, pp. 200–209. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2016-0293.
14. Barshilia H.C., Selvakumar N., Deepthi B., Rajam K.S. A comparative study of reactive direct current magnetron sputtered CrAlN and CrN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201, pp. 2193–2201. DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2006.03.037.
15. Yi P., Zhu L., Dong C., Xiao K. Corrosion and interfacial contact resistance of 316L stainless steel coated with magnetron sputtered ZrN and TiN in the simulated cathodic environment of a proton-exchange membrane fuel cell. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 363, pp. 198–202. DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2019.02.027.
16. Filippov A.V., Shamarin N.N., Moskvichev E.N., Novitskaya O.S., Knyazhev E.O., Denisova Yu.A., Leonov A.A., Denisov V.V. Investigation of the structural-phase state and mechanical properties of ZrCrN coatings obtained by plasma-assisted vacuum arc evaporation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 87–102. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-87-102.
17. Sue J.A., Perry A.J., Vetter J. Young's modulus and stress of CrN deposited by cathodic vacuum arc evaporation. *Surface and Coatings Technology*, 1994, vol. 68–69, pp. 126–130. DOI: 10.1016/0257-8972(94)90149-X.

18. Meenaatci A.T.A., Rajeswarapalanichamy R., Iyakutti K. Pressure induced phase transition of ZrN and HfN: a first principles study. *Journal of Atomic and Molecular Sciences*, 2013, vol. 4, no. 4, pp. 321–335. DOI: 10.4208/jams.121012.012013a.
19. Chimmat M., Srinivasan D. Understanding the Residual Stress in DMLS CoCrMo and SS316L using X-ray diffraction. *Procedia Structural Integrity*, 2019, vol. 14, pp. 746–757. DOI: 10.1016/J.PROSTR.2019.05.093.
20. Gorelik S.S., Rastorguev L.N., Skakov Yu.A. *Rentgenograficheskii i elektronnoopticheskii analiz* [X-Ray diffraction and electron-optical analysis]. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 366 p.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).