

СЕКЦИЯ 1

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.785.532:539.234

КОМПОЗИЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ AlCr(C)N/Zr(C)N

*И. П. Акула, к. т. н., физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь*

*Н. М. Чекан, к. ф.-м. н., физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь*

*М. Ю. Хома, физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь*

*С. Р. Онысько, к. т. н., Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь*

M. R. Ramesh, As. Prof., National Institute of Technology Karnataka, Karnataka, India

Sh. Joladarashi, National Institute of Technology Karnataka, Karnataka, India

R. Kadoli, National Institute of Technology Karnataka, Karnataka, India

Реферат

Получена и исследована система Zr(C)N/AlCr(C)N как составная часть композиционного покрытия, предназначенного для повышения эксплуатационного ресурса штоков гидравлических цилиндров и иных деталей взамен покрытий гальванического твердого хрома. Методом катодного дугового осаждения в вакууме с использованием как сепарированной, так и несепарированной плазмы были нанесены многослойные покрытия ZrN , ZrCN , AlCrN и AlCrCN в различной конфигурации на поверхность полированных образцов из стали 40X. Исследован химический состав осажденных покрытий и их фазовое состояние. Установлено наличие широких переходных зон по элементному составу в области границы раздела основа - покрытие. Определен тип покрытий бинарных ZrN и трехэлементных покрытий AlCrN как В1. Введение в их состав углерода приводит к формированию твердых растворов замещения в подрешетке неметаллов без изменения кристаллической структуры. Анализ коррозионной стойкости полученных многослойных покрытий выявил, что покрытия с использованием нижнего слоя AlCrN/AlCrCN и верхнего слоя ZrN/ZrCN обладают коррозионной стойкостью более чем в 7 раз выше относительно других вариантов нитридных и карбонитридных многослойных покрытий; ток коррозии для стальных образцов 40X с данными покрытиями на два порядка ниже, чем для образцов без покрытий.

Ключевые слова: сепарация плазмы, композиционное покрытие Zr(C)N/AlCr(C)N , химический состав, кристаллическая фаза, коррозионная стойкость.

COMPOSITE COATING AlCr(C)N/Zr(C)N

I. P. Akula, N. M. Chekan, M. Ju. Homa, S. R. Onysko,
M. R. Ramesh, Sh. Joladarashi, R. Kadoli

Abstract

A thin solid film system of Zr(C)N/AlCr(C)N was obtained and characterized. The solid film system is a upper part of a designing composite coating aimed to replace hard galvanic chromium commonly deposited onto plungers of hydro cylinders and other machine parts and technological accessories. The vacuum arc deposition method was applied in both non-filter mode and filter mode of the arc plasma to control a macroparticle content in the coatings deposited onto polished substrates made of grade 40X steel. Crystalline structures of these nitrides and carbonitrides were determined as B1 with formation of the solid solutions of carbon in the nitride sublattice. The research of element composition revealed a broad transit area at the film interfaces due to a high energy capacity of both zirconium and aluminium-chromium plasma. One of the most important performances of the coatings replaced hard chrome is their corrosion resistance. It was shown that the two layer, coating of AlCrN/AlCrCN (lower layer) and ZrN/ZrCN (top layer) possessed an excellent anti-corrosion property, which corrosion current is 7 times lower comparing with that of other layer combinations as well as two order of magnitude lower than that of the carbon steel substrate.

Keywords: plasma separation, Zr(C)N/AlCr(C)N composite coating, chemical composition, phase structure, corrosion resistance

Введение

Износостойкие покрытия, формируемые методами физического осаждения в вакууме (PVD) стали неотъемлемым атрибутом современного машиностроения, поскольку позволяют существенно улучшить эксплуатационные характеристики узлов машин и механизмов. Одной из областей применения, где такие покрытия могут показать высокую эффективность от их использования, является защита рабочих элементов гидроприводов, повсеместно используемых в автотракторной технике, авиации, роботизированных системах.

В процессе эксплуатации важнейшие элементы гидропривода – гидравлические цилиндры, поршни, штоки – испытывают значительные нагрузки и подвергаются изнашиванию, которое усиливается при воздействии агрессивных сред – солевых растворов, пыли, песка. У изношенных штоков на рабочей поверхности наблюдаются риски, царапины, отслаивания хромового покрытия, царапины, кольцеобразные следы вмятин, следы схватывания и коррозии [1]. Восстановление работоспособности гидроцилиндров является трудоемкой операцией и требует выполнения разборочно-сборочных работ, при проведении которых очень важно избежать появления дефектов, обусловленных перекосом сопрягаемых частей, разрывом или проворачиванием уплотнителей и так далее. Кроме того, при разборке-сборке гидроцилиндров к некоторым деталям требуется прилагать значительные усилия, что исключает ручную сборку и требует применения специализированных стендов. Поэтому актуальным вопросом является повышение срока эксплуатации гидроприводов. В настоящее время

на подавляющее большинство штоков наносится покрытие гальванического хрома (так называемый «твердый хром», или ГТХ), которое позволяет повысить срок службы изделия [2].

Существенным недостатком защитного гальванического хромового покрытия является наличие в нем пор и трещин, что может приводить к отслоению покрытия от основы и ее быстрому коррозионно-абразивному изнашиванию. Основным принципиальным недостатком технологического процесса гальванического хромирования связан с высокой токсичностью соединений шестивалентного хрома – побочного продукта гальванического процесса – и повышенными требованиями к системам вентиляции, утилизации электролита и водоочистки. После того, как процесс получения шестивалентного хрома в 90-е годы XX века был признан приводящим к появлению токсичных соединений, началась активная разработка альтернативных покрытий и безопасных методов их получения.

Анализ литературных данных [3] показывает, что наиболее эффективной альтернативой ГТХ являются покрытия на основе карбида вольфрама, никеля, хрома, кобальта, получаемые одной из разновидностей газотермического напыления – методом HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), что дословно означает высокоскоростное кислородное топливо, и известно также под названием «высокоскоростное газопламенное напыление».

Метод HVOF реализуется довольно просто на воздухе, но требуется устройство газотермического напыления со специальной камерой сгорания для создания высокого давления истечения газовой струи порядка (7–9) атм., за счет которого обеспечивается сверхзвуковая скорость напыляемых частиц (число Маха 3–5), что в свою очередь дает возможность получать плотные покрытия (пористость менее 1 %) с хорошей адгезией к основе [3]. Вместе с тем покрытия, получаемые методом HVOF, в частности NiCr, имеют ряд существенных недостатков и далеко не по всем свойствам превосходят покрытия твердого хрома. Наиболее сложными остаются проблемы с пористостью и шероховатостью рабочей поверхности. Для получения однородного слоя с достаточно небольшой плотностью сквозных пор на рабочей поверхности требуется значительное увеличение их толщины, что ведет к повышению шероховатости, а также увеличению вероятности отслоения покрытия с поверхности основы в процессе эксплуатации изделия. В результате требуется вводить дополнительную операцию шлифовки или полирования рабочей поверхности штоков гидроцилиндров. Для улучшения коррозионной стойкости напыленных покрытий HVOF приходится добавлять дорогостоящий кобальт в их состав, иначе коррозионная стойкость оказывается ниже коррозионной стойкости ГТХ [4].

Для решения этих проблем предлагается использовать гибридную технологию нанесения покрытий как методами HVOF, так и методами PVD путем формирования композиционного покрытия AlCr(C)N/Zr(C)N на функциональном покрытии HVOF.

Покрытия карбонитрида циркония обеспечивают лучшую износо- и коррозионностойкость по сравнению с широко используемым нитридом титана. Это связано с тем, что при равных условиях осаждения шероховатость покрытий ZrCN ниже, чем для TiN, (примерно в 1,5–2 раза) и существенно не увеличивается с ростом толщины осаждаемого тонкопленочного материала. Карбонитриды переходных металлов являются хорошим примером материалов,

сочетающих в себе не только оптимальную комбинацию элементов, но и требуемую кристаллографическую структуру в виде гранцентрированной кубической решетки, которая характерна для всех сверхтвердых материалов. Они имеют высокую адгезию к основам из различных сталей, сочетают в себе высокую пластичность и износостойкость что в конечном итоге позволяет многократно увеличить ресурс деталей, механизмов и различного рода технологической оснастки [5, 6]. В свою очередь покрытие AlCrN особенно привлекательно из-за его превосходной стойкости к окислению и достаточно высоких механических свойств, а также химической стабильности [7]. AlCrN обладает хорошей износостойкостью благодаря образованию восстанавливаемых оксидных слоев на изнашиваемых поверхностях, имеющих более низкие коэффициенты трения.

В связи с вышеизложенной информацией было сделано предположение, что вакуумное катодно-дуговое нанесение слоев нитрида хром-алюминия и карбонитрида циркония на поверхность основного слоя WC-NiCr позволит снизить сквозную пористость функционального покрытия, так как плазма благодаря своей способности "обволакивать" сложнопрофильные поверхности и равномерно распределяться по ним будет приводить к осаждению покрытий AlCrN/ZrCN в порах покрытия NiCr и в значительной степени закрывать их. К тому же, будучи существенно более твердым и износостойким покрытие AlCr(C)N/Zr(C)N в значительной степени увеличит срок службы основного покрытия NiCr. В свою очередь основное покрытие NiCr, являясь много тверже стали позволит избежать растрескивания и отслаивания PVD покрытий, которые характеризуются как высокой или сверхвысокой твердостью, так и значительной хрупкостью.

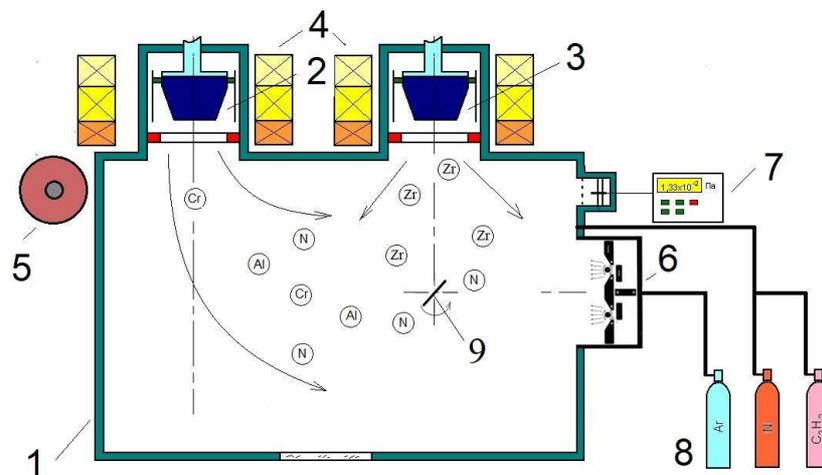
В настоящей статье рассматриваются вопросы получения и исследования покрытий системы AlCr(C)N/Zr(C)N на стали 40X, из которой обычно изготавливаются штоки гидравлических цилиндров.

Методика эксперимента

Покрытия AlCr(C)N/Zr(C)N осаждались на основу из стали 40X с использованием вакуумной установки УВНИПА-1-001 катодно-дуговым методом, реализация которого схематически представлена на рисунке 1. Для формирования покрытий AlCr(C)N использовался катод специального состава Al 70 ат. %, Cr 30 ат. %, изготовленный методом горячего прессования в вакууме смеси порошков металлов. Для осаждения покрытий Zr(C)N использовался катод из циркония марки Э110. Металлическая плазма формировалась с помощью источников стационарной металлической плазмы. При этом выполнялась сепарация плазмы с целью удаления макрочастиц для сильно эродируемого катода AlCr, в то же время для плазмы циркония сепарация не проводилась. Параметры осаждения покрытий приведены в таблице 1. Схема чередования слоев покрытия на основе из полированной стали 40X показана на рисунке 2.

Информация о химическом составе и структуре сформированных покрытий была получена методами микрозондовой энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на приставке Philips SEN-15 к сканирующему электронному микроскопу Tescan MIRA 3 LMU. Исследования структуры и элементного состава были выполнены на поперечном шлифе покрытий. Фазовый состав покрытий исследовался методами рентгеновской дифракции с использованием

дифрактометра GNR Explorer (Италия) с методом съемки скользящим пучком под углом 1° – 5° . Использовалось $K\alpha$ излучение медного катода на длине волны $\lambda = 0,154060$ нм.



1 – вакуумная камера; 2 – система электромагнитных катушек для управления движения катодных пятен и отклонения потока плазмы; 3 – источник несепарированной плазмы с катодом Zr; 4 – источник сепарированной плазмы с катодом AlCr; 5 – отклоняющие электромагнитные катушки; 6 – газовый ионно-лучевой источник; 7 – вакуумметр; 8 – газовые баллоны; 9 – основа

Рисунок 1 – Схема осаждения покрытий с использованием вакуумной установки УВНПА-1-001

Таблица 1 – Условия получения покрытий AlCr(C)N / Zr(C)N

| № образца | Многослойное покрытие | Катод | Ток дуги, А | Парциальное давление газа, Па $\times 10^{-2}$ | | Напряжение смещения, В | Время, мин |
|-----------|-----------------------|-------|-------------|------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------|------------|
| | | | | N ₂ | C ₂ H ₂ | | |
| 1 | ZrN/ZrCN | Zr | 90/90 | 1,8/1,5 | 1,0 | -100 | 5/15 |
| 2 | AlCrN/AlCrCN | AlCr | 55/55 | 1,3/1,3 | 0,7 | | 10/20 |
| 3 | AlCrN | AlCr | 55 | 1,3 | – | | 10 |
| | ZrN/ZrCN | Zr | 90/90 | 1,8/1,5 | 1,0 | | 5/15 |
| 4 | AlCrN/AlCrCN | AlCr | 55/55 | 1,3/1,3 | 0,7 | | 7/10 |
| | ZrN/ZrCN | Zr | 90/90 | 1,8/1,5 | 1,0 | | 5/20 |
| 5 | ZrN/ZrCN | Zr | 90/90 | 1,8/1,5 | 1,0 | 5/15 | |
| | AlCrN | AlCr | 55 | 1,3 | – | 10 | |
| 6 | ZrN/ZrCN | Zr | 90/90 | 1,8/1,5 | 1,0 | 5/20 | |
| | AlCrN/AlCrCN | AlCr | 55/55 | 1,3/1,3 | 0,7 | 7/10 | |

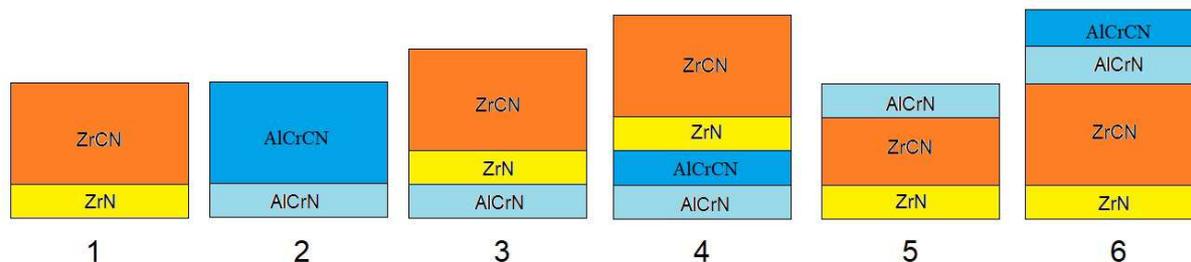


Рисунок 2 – Схема расположения слоев в композиционных покрытиях

Коррозионная стойкость сформированных покрытий определялась электрохимическими исследованиями при помощи потенциостата Multi Autolab M-204 в 3 %-ном водном растворе NaCl.

Результаты исследований

Данные по распределению химических элементов представлены на рисунке 3.

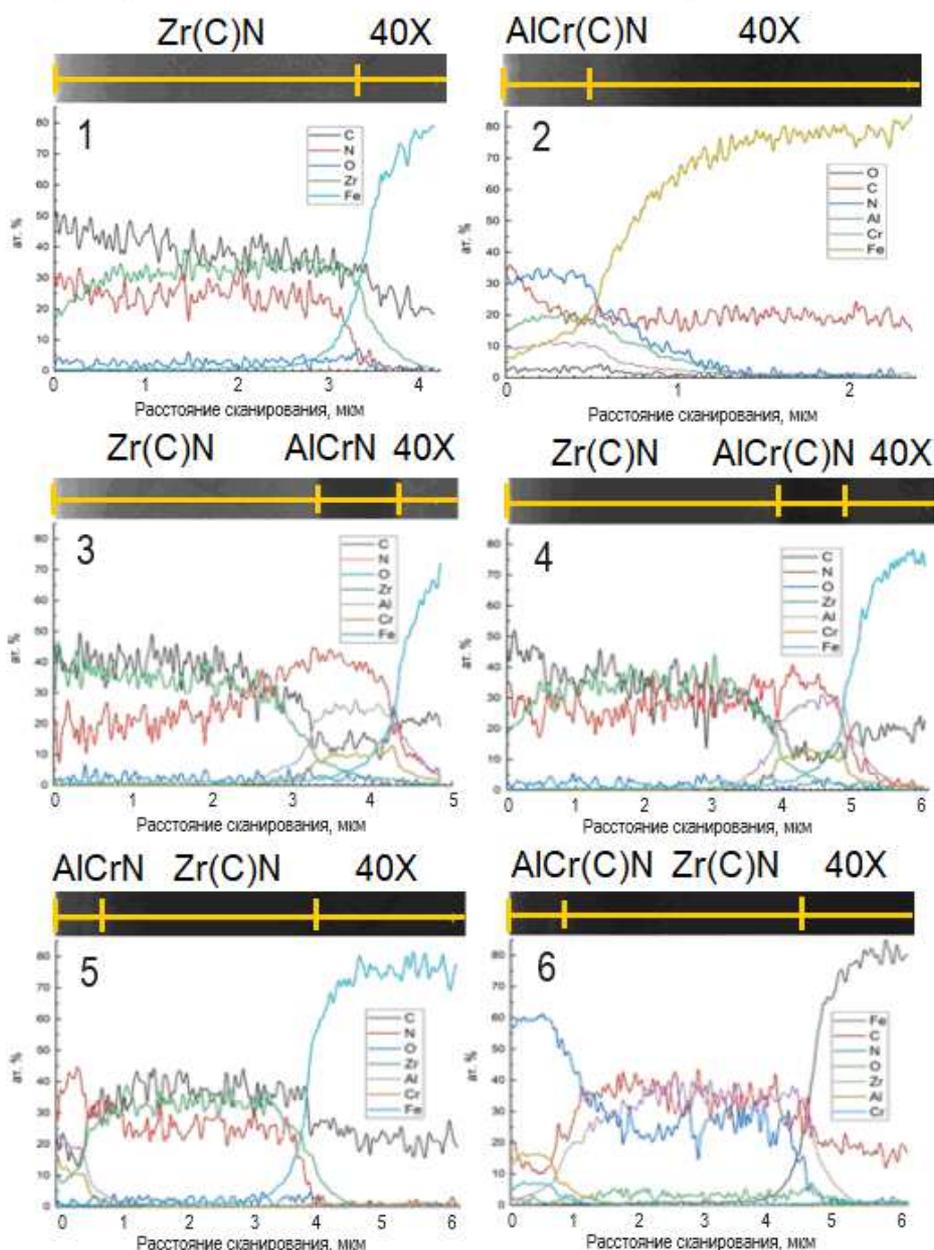


Рисунок 3 – Распределение химических элементов в поперечном шлифе покрытий от поверхности к основе вдоль желтой линии. Номера рисунков соответствуют номерам образцов покрытий таблицы 1 и рисунка 2

На изображении поверхности видна граница раздела между покрытием и основой. Толщина композиционного покрытия составляет (3,2–4,5) мкм. Толщина покрытия ZrCN составляет порядка 3,5 мкм., а покрытия AlCrCN – 0,5 мкм. Это связано с условиями нанесения покрытий, когда тонкопленочный материал AlCrCN формировался из потоков плазмы в условиях электромагнитной сепарации, существенно уменьшающих скорость нанесения покрытий. На графике элементного состава на границе раздела между основой и покрытием виден переходный слой, что связано, скорее всего, с шероховатостью поверхности основы. Отношение атомарного содержания Al и Cr в покрытии находится в пределах от 1,7 до 2,3 и на верхнем пределе приблизительно соответствует составу катода (Al 70 ат. %, Cr 30 ат. %).

На рисунке 4 представлен фазовый анализ покрытий, выполненный в скользящем (вдоль границы раздела "покрытие – основа"), что позволило получить детальную информацию о структуре многослойных покрытий. Нарушение целостности системы покрытий № 6 не позволило выполнить ее фазовый анализ.

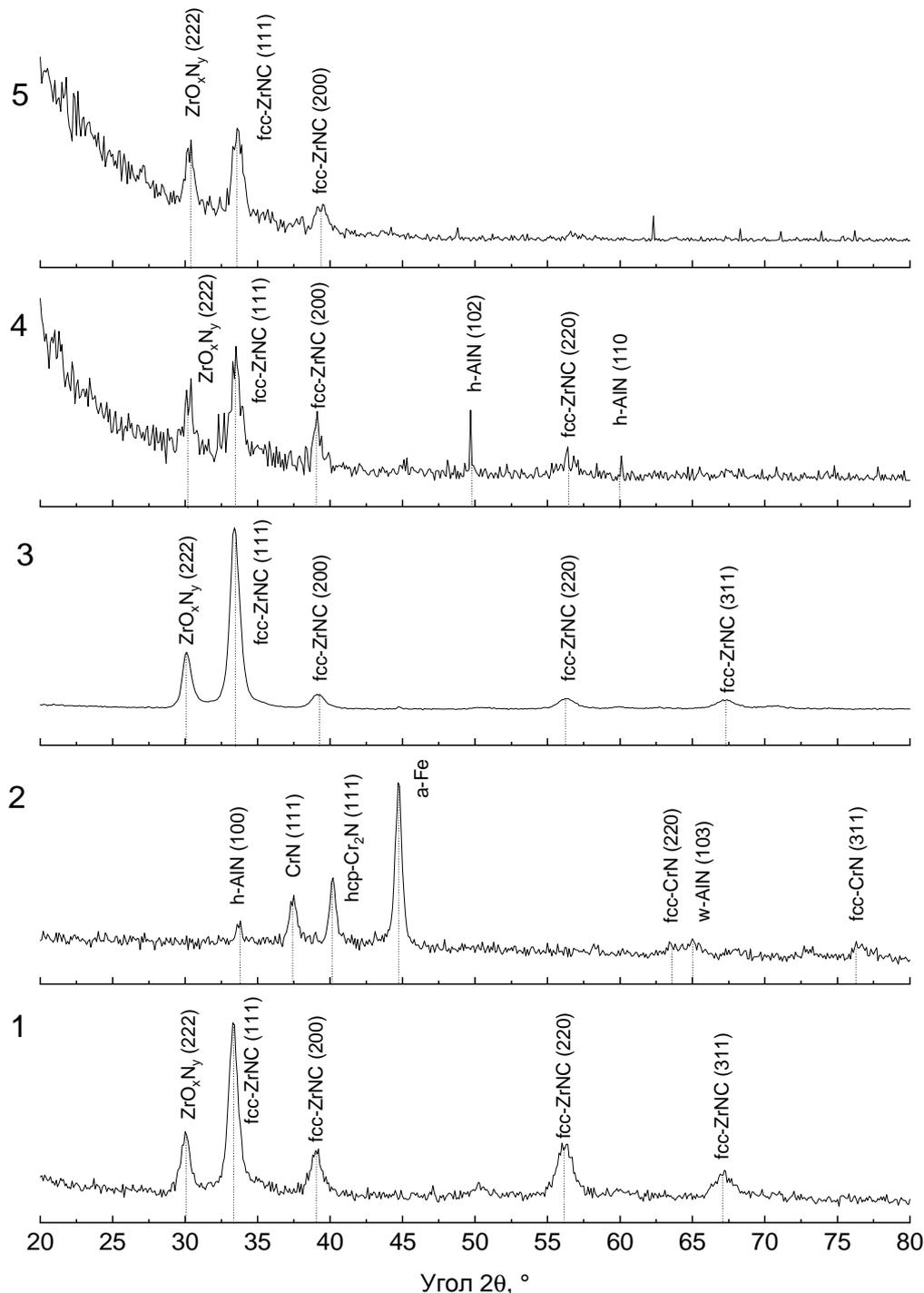


Рисунок 4 – Дифрактограммы, полученные в скользящем рентгеновском излучении для образцов покрытий ZrCN/AlCrCN в соответствии с их номерами на рисунке 2

На рентгенограмме для покрытия ZrCN присутствуют пики при $33,2^\circ$ (111), $38,9^\circ$ (200), $56,2^\circ$ (220) и $67,3^\circ$ (311), которые ассоциируются с твердым раствором замещения углерода в структуре ZrN путем встраивания в узлы подрешетки неметаллов. Покрытия ZrCN имеют ГЦК-структуру [8]. Рентгенофазовый анализ свидетельствует, что полученный тонкопленочный материал является

композиционным с кристаллитами $ZrCN$, равномерно расположенными по объему осажденного материала. Преобладающей является интенсивность рефлекса (111). Проявления такого рода осевой текстуры характерно для пленок керамик циркония и титана, полученных при относительно низких температурах основы [9]. Ориентирующее влияние подложки объясняется большим значением межфазной энергии для плотноупакованных плоскостей (111) ГЦК решетки нитридов и карбидов циркония [10]. Рост температуры основы приводит к смене текстуры на (222) из-за конкурирующего влияния ростовых напряжений, вызываемых несоответствием параметров кристаллических решеток основы и пленки [9]. Стоит упомянуть пик при 30° (222). По литературным данным его появление может быть связано с появлением ZrO_xN_y [11], для которого положение максимума дифракционного пика находится около угла 30° . Это подтверждается исследованиями химического состава покрытий (рисунок 3), которые показывают наличие кислорода в покрытии (около 3 ат. %). Полученные результаты говорят о формировании тонкопленочного соединения со сложной фазовой структурой.

Фазовый состав покрытия $AlCrCN$, исследуемого в скользящем пучке рентгеновского излучения, показал присутствие соединения CrN (пики при $37,2^\circ$, $63,5^\circ$ и $77,1^\circ$) с различной ориентацией кристаллической решетки фазы и с типом кристаллической решетки B1 (структура NaCl) [12], соединения Cr_2N ($40,5^\circ$), а также соединения AlN ($33,5^\circ$ и $65,0^\circ$). Аналогичные результаты были получены в работах [12, 13].

Для образцов покрытий 3–5 на дифрактограммах присутствуют пики, ассоциированные с карбонитридом циркония, по аналогии с образцом 1. Исключением является образец 4, для которого при углах 50° и 60° присутствуют пики, относящиеся к гексагональной фазе нитрида алюминия типа вюрцита [12]. Отсутствие пиков от нитридов хрома и алюминия на образцах 3–5, вероятно, связано с частичным совпадением положения этих пиков с пиками, относящимися к карбонитриду циркония, уровень сигнала от которых превышает таковой от пиков AlN и CrN . Косвенно это подтверждается нарушением симметрии пиков, например при $2\theta = 39^\circ \dots 40^\circ$ для образцов 3–5.

Исследования коррозионной стойкости показали, что для стали 40X, содержащей хром (~ 1 %), никель 0,3 % и относящейся к коррозионностойким сталям, тем не менее наблюдается значительный ток коррозии порядка $I_k = 1,79 \times 10^{-5}$ А, при этом потенциал коррозии составляет $E_k = -645$ мВ (рисунок 5).

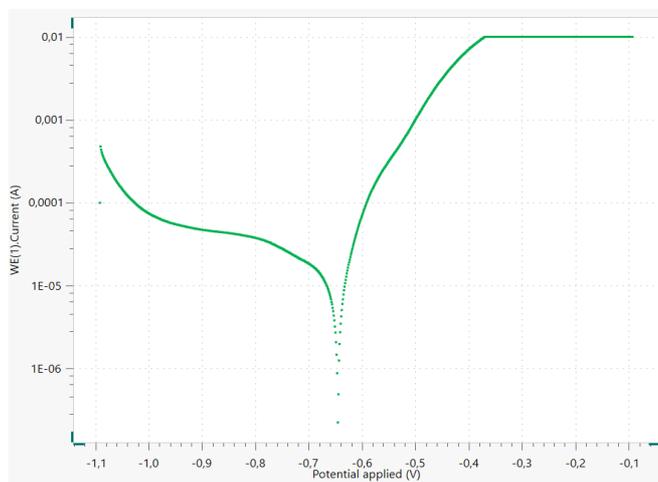


Рисунок 5 – Поляризационная кривая для стали 40X

Нанесение покрытий существенным образом изменяет электрохимические свойства поверхности стали 40X. На рисунке 6 представлена характерная поляризационная кривая для стали 40X с двухслойным покрытием ZrN/ZrCN. Можно видеть, что она расположена ниже соответствующей кривой для стали без покрытия, что означает более высокую коррозионную стойкость карбонитрида циркония по сравнению с нержавеющей сталью.

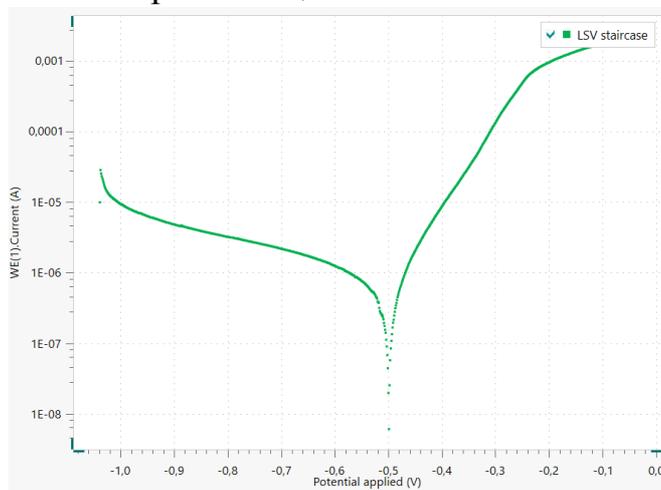


Рисунок 6 – Поляризационная кривая для образца с покрытием ZrN/ZrCN

Обработка поляризационных кривых по обычной процедуре путем экстраполяции Тафеля позволяет рассчитать значения потенциала коррозии E_c и тока коррозии I_c [14] для различных условий получения многослойных покрытий, которые приведены в таблице 1. Данные по этим параметрам, а также по стационарному потенциалу E_{cm} , сведены в таблицу 2.

Можно видеть, что использование покрытий, содержащих хром и алюминий типа AlCrN и верхнего слоя из ZrN/ZrCN (покрытие 3), а также AlCrN/AlCrCN и верхнего слоя из ZrN/ZrCN (покрытие 4), приводит к скачкообразному уменьшению тока коррозии со значения 651 нА для покрытия ZrN/ZrCN (покрытие 1) до 89,5 нА и 42,4 нА, соответственно. Использование сочетания нитридов и карбонитридов в обоих слоях обеспечивает наиболее эффективную защиту основы от коррозии. Покрытия, содержание помимо нитридного слоя также карбонитридный, обладают менее развитой столбчатой структурой и предотвращают проникновение вызывающего коррозию соленого раствора к защищаемой основе. В результате покрытие AlCrN/AlCrCN/ZrN/ZrCN повышает коррозионную стойкость стали 40X более чем в 420 раз и является наиболее эффективным из всех исследуемых покрытий. Анализ оптических изображений покрытий показал, что аномально низкая коррозионная стойкость покрытия 6 связана с его растрескиванием и локальными микроотслоениями.

Таблица 2 – Электрохимические характеристики стали 40X с покрытиями

| Образец | Электрохимические характеристики | | |
|---------|----------------------------------|-------------|--------------------|
| | $E_{ст}, мВ$ | $E_{к}, мВ$ | $I_{к}, 10^{-9} А$ |
| 1 | -539 | -498 | 651 |
| 2 | -524 | -477 | 512 |
| 3 | -442 | -334 | 42,4 |
| 4 | -477 | -448 | 89,5 |
| 5 | -493 | -467 | 504 |
| 6 | -612 | -588 | 31400 |
| Основа | -592 | -645 | 17900 |

Заключение

Выполнено осаждение покрытий AlCr(C)N/Zr(C)N на образцы стали 40X для выявления оптимальной слоистой структуры композиционного покрытия. С использованием методик сканирующей электронной микроскопии подтверждена многослойность сформированных покрытий, также установлено наличие широких переходных зон по элементному составу в области границы раздела основа – покрытие, что, скорее всего, связано с высокой скоростью взаимодиффузии компонент покрытия. Показано, что отношение концентраций алюминия и хрома в покрытиях AlCr(C)N ниже чем в катоде (2,33) и находится в диапазоне от 1,7:1 до 2,3 в покрытии.

Исследования с использованием методов рентгеновской дифрактометрии осажденных покрытий на основе нитридов и карбонитридов циркония и алюминия/хрома позволили определить тип структуры бинарных покрытий ZrN и тройных покрытий AlCrN как B1. Введение в их состав углерода происходит путем формирования твердых растворов замещения в подрешетке неметаллов без изменения кристаллической структуры. Растворенный углерод, деформируя кристаллическую решетку нитридов циркония или хром-алюминия, затрудняет движение дислокаций под нагрузкой и обеспечивает упрочнение полученных тонкопленочных материалов.

Проведенный анализ коррозионной стойкости полученных многослойных покрытий выявил, что покрытия с использованием компоновки в виде нижнего слоя из AlCrN/AlCrCN и верхнего слоя из ZrN/ZrCN обладают коррозионной стойкостью выше более чем в 7 раз относительно других вариантов многослойных покрытий и на два порядка больше чем сталь 40X.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ по договору T23ИНДГ-008 и департамента науки и технологий (DST) Министерства образования и науки Республики Индия (проект DST P-40/2023).

Список цитированных источников

1. Рылякин, Е. Г. Обеспечение работоспособности гидропривода мобильных машин при низких температурах: моногр. / Е. Г. Рылякин, Ю. А. Захаров. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 124 с.
2. Papatheodorou, T. Influence of hard-chrome plated rod surface treatments on the sealing behavior of hydraulic rod seals / T. Papatheodorou // *Sealing Technol.* – 2005. – No. 4. – P. 21–27.
3. Picas, J. A. Tribological evaluation of HVOF thermal-spray coatings as a hard chrome replacement / J. A. Picas, M. Punset, M. T. Baile [at al.] // *Surf. Interface Anal.* – 2011. – Vol. 43. – P. 1346–1353.
4. Srivastava, M. Ni–Mo–Co ternary alloy as a replacement for hard chrome / M. Srivastava, C. Anandan, V. W. Grips // *Applied Surface Science.* – 2013/ – Vol. 15 (285). – P. 167–174.
5. Veprek, S. Industrial application of superhard nanocomposite coatings / S. Veprek, M. J. G. Veprek-Heijman // *Surface and Coating Technology.* – 2008. – Vol. 202. – P.5063–5073.
6. Chen, C. S. Diffusion barrier properties of amorphous ZrCN films for copper metallization. / C. S. Chen, C. P. Liu // *Journal of Non-Crystalline Solids.* – 2005. – Vol. 351. – P. 3725–3729.
7. Long, Y. Microstructure of TiAlN and CrAlN coatings and cutting performance of coated silicon nitride inserts in cast iron turning. / Y. Long, J. Zeng, D. Yu, S. Wu // *Ceramics International.* – 2014. – Vol. 40. – P.9889–9894.
8. Frank, F. Microstructure and Mechanical Properties of ZrN, ZrCN and ZrC Coatings Grown by Chemical Vapor Deposition / F. Frank, M. Tkadletz, Ch. Czettel, N. Schalk // *Coatings.* – 2021. – Vol. 11. – P. 491–498.
9. Ashok, K. Effect of substrate temperature on structural and materials properties of zirconium nitride films on D9 steel substrates / K. Ashok // *Crystal Research Technology.* – 2009. – Vol. 44. – P.511–516.

10. Abadias, G. Stress and preferred orientation in nitride-based PVD coatings / G. Abadias // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P.2223–2235.
11. Cubillosa, G. I. Corrosion resistance of zirconium oxynitride coatings deposited via DC unbalanced magnetron sputtering and spray pyrolysis-nitriding / G. I. Cubillosa, M. Bethencourt, J. J. Olaya // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 327. – P. 288–295.
12. Gilewicz, A. Influence of Substrate Bias Voltage on Structure, Morphology and Mechanical Properties of AlCrN Coatings Synthesized Using Cathodic Arc Evaporation / A. Gilewicz, R. Jedrzejewski, P. Myslinski, B. Warcholinski // *Tribology in Industry*. – 2019. – Vol. 41. – P. 484–497.
13. Kuznetsova, T. Effect of metallic or non-metallic element addition on surface topography and mechanical properties of CrN coatings / T. Kuznetsova, V. Lapitskaya, A. Khabarava [et al.] // *Nanomaterials*. – 2020. – Vol. 10. – P. 2361–2376.
14. Manfild, F. Tafel slopes and corrosion rates from polarization resistance measurements / F. Manfild // *Corrosion*. – 1973. – Vol. 29. – P. 397–402.

References

1. Ryljakin, E.G. Obespechenie rabotosposobnosti gidroprivoda mobil'nyh mashin pri nizkikh temperaturah: monogr. / E.G. Ryljakin, Ju.A. Zaharov. – Penza: PGUAS, 2014. – 124s.
2. T. Papatheodorou. Influence of hard-chrome plated rod surface treatments on the sealing behavior of hydraulic rod seals / *Sealing Technol.* -2005. - No. 4. – P. 21–27.
3. J.A. Picas, M. Punset, M.T. Baile, E. Martín, A. Forn. Tribological evaluation of HVOF thermal-spray coatings as a hard chrome replacement // *Surf. Interface Anal.* - 2011. Vol. 43. – P. 1346–1353.
4. M. Srivastava, C. Anandan, V.W. Grips. Ni–Mo–Co ternary alloy as a replacement for hard chrome // *Applied Surface Science*. – 2013 - Vol. 15 (285). - P. 167-174.
5. Veprek S., Veprek-Heijman M.J.G. Industrial application of superhard nanocomposite coatings // *Surface and Coating Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P.5063-5073.
6. Chen C.S., Liu C.P. Diffusion barrier properties of amorphous ZrCN films for copper metallization. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2005. – Vol. 351. – P.3725–3729.
7. Long Y., Zeng J., Yu D., Wu S. Microstructure of TiAlN and CrAlN coatings and cutting performance of coated silicon nitride inserts in cast iron turning. // *Ceramics International*. – 2014. – Vol. 40. – P.9889-9894.
8. F. Frank, M. Tkadletz, Ch. Czettel, N. Schalk. Microstructure and Mechanical Properties of ZrN, ZrCN and ZrC Coatings Grown by Chemical Vapor Deposition // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11. – P. 491 –498.
9. K. Ashok. Effect of substrate temperature on structural and materials properties of zirconium nitride films on D9 steel substrates // *Crystal Research Technology*. – 2009. – Vol. 44. – P.511 – 516.
10. G. Abadias. Stress and preferred orientation in nitride-based PVD coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P.2223 – 2235.
11. G.I. Cubillosa, M. Bethencourt, J.J. Olaya. Corrosion resistance of zirconium oxynitride coatings deposited via DC unbalanced magnetron sputtering and spray pyrolysis-nitriding // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 327. – P. 288 – 295.
12. A. Gilewicz, R. Jedrzejewski, P. Myslinski, B. Warcholinski Influence of Substrate Bias Voltage on Structure, Morphology and Mechanical Properties of AlCrN Coatings Synthesized Using Cathodic Arc Evaporation // *Tribology in Industry*. – 2019. Vol. 41. – P. 484 – 497.
13. T. Kuznetsova, V. Lapitskaya, A. Khabarava, S. Chizhik, B. Warcholinski, A. Gilewicz, A. Kuprin, S. Aizikovich, B. Mitrin. Effect of metallic or non-metallic element addition on surface topography and mechanical properties of CrN coatings // *Nanomaterials*. – 2020. – Vol. 10. – P. 2361 –2376.
14. F. Manfild. Tafel slopes and corrosion rates from polarization resistance measurements // *Corrosion*. – 1973. – Vol. 29. – P. 397–402.