

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-108-122

## МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ ТИПОВ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Я.В. Толмачев<sup>1</sup>, А.А. Абрашов<sup>1</sup>, С.В. Заварзин<sup>2</sup>, Т.А. Ваграмян<sup>1</sup>, А.В. Князев<sup>2</sup>, А.В. Медынская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Москва, Россия; pochta@muctr.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Светопоглощающие покрытия широко применяют в оптическом приборостроении и для превращения солнечной энергии в тепловую. Приведены различные методы нанесения светопоглощающих покрытий. Рассмотрены светопоглощающие покрытия, нанесенные как из жидкой, так и из газовой фазы. Детально обсуждаются их основные оптические свойства. Проведено сравнение преимуществ и недостатков светопоглощающих покрытий, полученных различными методами, в том числе их коррозионное поведение и механические свойства.

**Ключевые слова:** светопоглощающие покрытия, солнечные коллекторы, электроосаждение, черный никель, черный хром, светопоглощение

**Для цитирования:** Толмачев Я.В., Абрашов А.А., Заварзин С.В., Ваграмян Т.А., Князев А.В., Медынская А.В. Методы получения и свойства основных типов светопоглощающих покрытий // Труды ВИАМ. 2024. № 4 (134). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-108-122.

Scientific article

## PRODUCTION METHODS AND PROPERTIES OF COMMON TYPES OF LIGHT-ABSORBING COATINGS

Ya.V. Tolmachev<sup>1</sup>, A.A. Abrashov<sup>1</sup>, S.V. Zavarzin<sup>2</sup>,  
T.A. Vagramyan<sup>1</sup>, A.V. Knyazev<sup>2</sup>, A.V. Medynskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology», Moscow, Russia; pochta@muctr.ru

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Light-absorbing coatings are widely used for the construction of optical instruments and for converting sunlight into thermal energy. This article presents various production methods of light-absorbing coatings. Coatings obtained from both liquid and gas phases are reviewed. Their optical properties are particularly discussed. A comparison of advantages and drawbacks of light-absorbing coatings obtained by different methods, including their corrosion behavior and mechanical properties is conducted.

**Keywords:** light-absorbing coatings, solar collectors, electrodeposition, black nickel, black chrome, light-absorption

**For citation:** Tolmachev Ya.V., Abrashov A.A., Zavarzin S.V., Vagramyan T.A., Knyazev A.V., Medynskaya A.V. Production methods and properties of common types of light-absorbing coatings. *Trudy VIAM*, 2024, no. 4 (134), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-108-122.

### Введение

Нанесение покрытий является одним из основных методов защиты и обеспечения заданных свойств поверхностей изделий из различных материалов [1, 2]. Черные покрытия широко используются как в декоративных целях, так и для создания теплопоглощающих поверхностей. Покрытия должны отвечать требованиям, предъявляемым к механическим свойствам, прежде всего износостойкости, обладать высокой коррозионной стойкостью в предполагаемых средах эксплуатации и сверхвысокой поглощающей способностью в случае применения в качестве солнечных коллекторов [3, 4].

Основная область применения черных покрытий – производство солнечных коллекторов, которые преобразуют световую энергию в тепловую и применяются для нагрева воды, воздуха или других теплоносителей. Материалы для изготовления солнечных коллекторов должны обладать способностью к поглощению, хранению и передаче энергии теплоносителю с минимальными тепловыми потерями. Для удовлетворения данных требований необходимо максимально увеличить коэффициент светопоглощения ( $\alpha > 0,95$ ) и минимизировать коэффициент теплового излучения ( $\varepsilon < 0,10$ ) используемого материала. Поскольку передача энергии от покрытия материалу солнечного коллектора происходит в результате теплообмена, необходима высокая теплопроводность. Соотношение коэффициентов теплового излучения и светопоглощения называют селективностью. Чем выше селективность, тем большую долю солнечной энергии покрытие поглощает.

Черные покрытия со сверхвысоким поглощением также имеют первостепенное значение при разработке наземных и космических оптических приборов и датчиков, используемых для измерений в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра [5]. Такие покрытия улучшают поглощающую способность детекторов тепла и подавляют нежелательные отражения или рассеяния света в оптических системах, таких как корпуса телескопов. Это позволяет уменьшить физический размер прибора без ущерба для производительности. Данные покрытия успешно используются в дефлекторных приборах многих космических аппаратов. Кроме того, благодаря стабильному сверхвысокому уровню поглощающих свойств некоторые черные поверхности используются в качестве эталонов для космической калибровки [6].

Не меньший интерес вызывают и декоративные свойства черных покрытий. Если для материалов солнечных коллекторов учитывается коэффициент светопоглощения  $\alpha$ , то для оценки декоративных покрытий обычно используют систему измерения цвета СИЕ, которая основана на восприятии цвета человеком. В этом случае черный цвет оценивается по значению параметра  $L^*$ , который является мерой светлоты объекта и указывает на его светоотражающие свойства. Параметры  $\alpha$  и  $L^*$  измеряют одно и то же свойство, но явной зависимости между ними нет.

В системе СИЕ используют координаты  $L^*$ ,  $a^*$  и  $b^*$ . Координата  $L^*$ , которая выражает светлоту, варьируется от 0 для черного тела до 100 для белого. Координата  $L^*$  представляет собой вертикальную ось, тогда как  $a^*$  и  $b^*$  описывают горизонтальную плоскость. Координата  $a^*$  указывает положение цвета между красным (положительные значения) и зеленым (отрицательные), координата  $b^*$  – положение между желтым (положительные) и синим (отрицательные).

Наиболее распространенными методами получения черных покрытий, как декоративных, так и применяемых в качестве солнечных коллекторов, является осаждение из жидкой и газовой фазы. Гальваническими методами получают преимущественно черный никель и черный хром, осаждением из газовой фазы – покрытия на основе титана и углерода.

Цель данной работы – анализ методов подготовки для нанесения и свойств наиболее часто применяемых черных покрытий.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Светопоглощающие покрытия, получаемые осаждением из жидкой фазы

Черный никель [7, 8], черный цинк [9], черный хром [10], черный фосфат [11], черный кобальт [12] и сплавы на основе черного молибдена [13, 14] являются наиболее известными покрытиями, получаемыми осаждением из жидкой фазы (рис. 1). Среди них наиболее изучены покрытия на основе никеля и хрома, которые нашли широкое применение в производстве солнечных коллекторов.

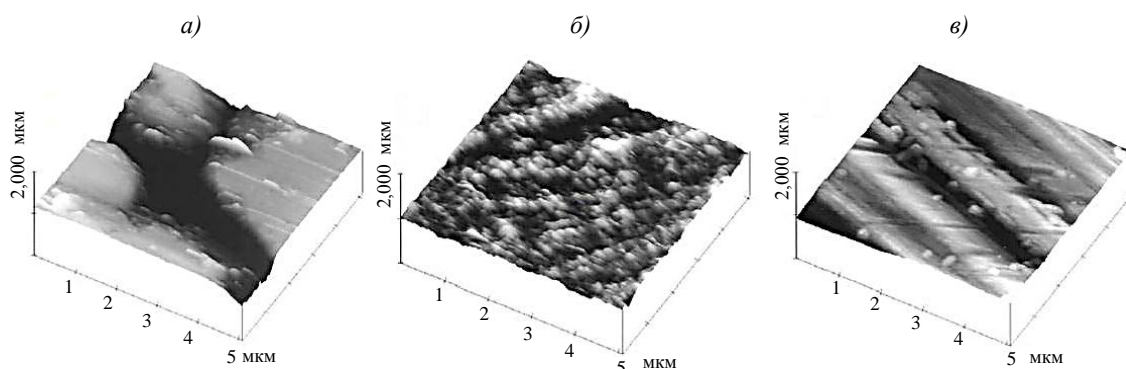


Рис. 1. Необработанная поверхность нержавеющей стали (а), черного (б) и обычного (в) кобальтового покрытий (атомно-силовая микроскопия)

### Никель и его сплавы

Черные никелевые покрытия получают методом химического (бестокового) или электрохимического осаждения на различные металлические подложки [15, 16]. Конверсионные никелевые черные покрытия изготавливают путем химического преобразования оцинкованной подложки.

Самым нестандартным методом нанесения черных никелевых покрытий можно считать контактное осаждение. В работе [17] черные никелевые покрытия изготавливали путем химического преобразования оцинкованного алюминия в растворе, содержащем сульфат никеля, сульфат никеля-аммония, сульфат цинка и тиоционат аммония. Изучено влияние морфологии поверхности основного металла на оптические свойства покрытий. Полученное покрытие характеризуется коэффициентом светопоглощения  $\alpha$  в диапазоне от 0,90 до 0,94, коэффициентом теплового излучения  $\epsilon$  – от 0,08 до 0,15.

Данное исследование базируется на более ранней работе [18], посвященной изучению контактного осаждения черных покрытий из электролита никелирования на основе сульфата никеля, тиосульфата аммония и ацетата натрия. Этот метод чернения открыт случайно: авторы работы [19] обнаружили, что черное покрытие образуется без использования внешнего тока.

Черный никель можно получить путем электроосаждения из сульфатного электролита [19], при этом черный цвет обуславливается формированием частиц  $ZnS$  и  $NiS$  [10]. Электролит содержит  $NiSO_4 \cdot 6H_2O$  (0,63 M),  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$  (0,09 M),  $H_3BO_3$  (0,3 M) и различные концентрации  $KNO_3$ . Состав представляет собой электролит Уоттса, модифицированный путем добавления небольшого количества нитрата калия, позволяющего добиться черного цвета покрытия. В качестве подложки использовали стальной лист,

в качестве анода – платиновый. Наиболее эффективные покрытия получены при добавлении в электролит Уоттса 0,2 М  $\text{KNO}_3$ . При этом использованы следующие режимы осаждения:  $\text{pH} = 4,6$ , плотность тока  $0,5 \text{ A/дм}^2$ , температура  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , продолжительность 10 мин. Кроющая способность изготовленного покрытия выше (61 %), чем у обычных белых никелевых покрытий, изготовленных при тех же условиях электроосаждения (28 %). Полученное покрытие не отслаивается и не меняет цвет после выдержки в кипящей воде в течение 15 мин. Потенциостатические кривые зависимости тока от времени указывают на мгновенную нуклеацию. Рентгенофлуоресцентный анализ показал, что осадок черного никеля состоит из металлического никеля с предпочтительной ориентацией (111). Однако полученные никелевые покрытия не обладают достаточной коррозионной стойкостью во влажной среде при повышенных температурах.

Покрyтия, осажденные из электролита, содержащего ионы никеля и хлорид натрия, не обладают этим недостатком [20, 21]. Коэффициенты светопоглощения и теплового излучения таких покрытий составляют 0,96 и 0,10 соответственно. Полученные результаты также подтверждаются в исследовании [15]. При схожих экспериментальных условиях осаждением на подложки из нержавеющей стали получен черный никель, характеризующийся коэффициентами светопоглощения и теплового излучения 0,91 и 0,10 соответственно.

Электрохимическим путем можно также получить черные никель-кобальтовые и никель-медные покрытия. В работе [22] наилучшее покрытие получали электроосаждением при плотности тока  $3,5 \text{ A/дм}^2$  в течение 30 с. Коэффициенты светопоглощения и теплового излучения данного покрытия составляют 0,91 и 0,04 соответственно. Покрытие состоит из частиц неправильной формы, обладает высокой микрошероховатостью и дендритной структурой. Высокая степень поглощения солнечного излучения объясняется интерференцией волн света и шероховатостью поверхности. Кроме того, следует отметить, что плотность тока при осаждении значительно влияет на оптические свойства покрытия, поскольку более высокие значения требуют меньше времени для получения заданной толщины покрытия.

Химическое никелирование представляет собой автокаталитический процесс, в ходе которого на каталитически активной подложке с помощью контролируемой реакции образуется осадок никеля [23, 24]. Часто данный процесс реализуется в присутствии гипофосфитов, которые выступают в качестве восстановителя для ионов металла в растворе.

Благодаря уникальному сочетанию свойств, таких как коррозионная стойкость, износостойкость, твердость, гладкость, адгезия и однородность независимо от формы подложки, химические никелевые покрытия широко применяют для отделки металлических изделий [25]. Данные покрытия используются также в компьютерной промышленности для производства алюминиевых жестких дисков, так как при содержании фосфора  $>10 \%$  являются немагнитными материалами [26].

Уровень механических свойств и коррозионная стойкость черных никелевых покрытий значительно повышаются при соосаждении фосфора. Черные химические покрытия системы Ni–P с содержанием фосфора от 1 до 15 % (по массе) можно получить электроосаждением из электролита. Чернение проводится путем травления осажденного химического никелевого покрытия в окисляющем растворе серной кислоты (5,5 М) и нитрата натрия (4,1 М) при температуре  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 10 с [7].

Анализ химического состава и микроструктуры методом атомно-силовой микроскопии с различным содержанием фосфора показал, что поверхность покрытий системы Ni–P после травления становится более гладкой, а нодулярная структура, свойственная нетравленому покрытию, превращается в выпуклую псевдозакрытую (рис. 2).

Кроме того, травление приводит к увеличению содержания фосфора в поверхностном слое из-за преимущественного растворения никеля. Оптимальный диапазон содержания фосфора для получения черного никеля с низкой отражательной способностью ( $0,46 \pm 0,02$  % при длине волны 633 нм) составляет от 3 до 7 % (по массе).

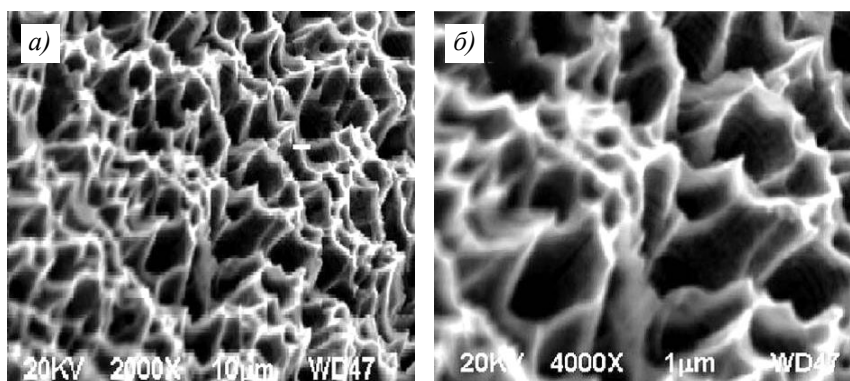


Рис. 2. Микроструктуры химического покрытия системы Ni–P до (а) и после (б) травления (атомно-силовая микроскопия)

Содержание фосфора в химических никелевых покрытиях, полученных восстановлением ионов никеля гипофосфитом из водного раствора, колеблется в пределах от 2 до 15 % в зависимости от состава раствора и условий осаждения [27]. Благодаря наличию фосфористых отложений химические никелевые покрытия легко поддаются травлению в окисляющих кислотах, что приводит к образованию сверхчерной поверхности. Высокая светопоглощающая способность связана с уникальной микроструктурой таких покрытий, состоящей из плотного массива микроскопических конических пор, расположенных перпендикулярно поверхности (рис. 3). Эта структура, полученная методом селективного травления, способна поглощать более 99 % света в солнечном диапазоне (300–2000 нм) [28].



Рис. 3. Структура поперечного сечения химического никелевого покрытия до (а) и после (б) травления

В работе [13] описан простой процесс химического иммерсионного чернения никеля для получения покрытия со сверхвысокой поглощающей способностью. Такие покрытия устойчивы в космической среде и представляют собой композит, включающий слои металла, оксида металла и фосфата. Черные краски с органическими связующими не рекомендуется использовать для оптических космических приборов из-за высокой общей потери массы и значительного содержания летучих веществ. При низких температурах летучие вещества, выделяющиеся из этих материалов, могут осаждаться на зеркалах, влияя на их оптические характеристики [29]. Черный химический никель,

представляющий собой неорганическое покрытие, незначительно меняет массу в космосе, что делает его идеальным материалом для таких условий.

Химическое покрытие системы Ni–P наносили на алюминиевую подложку. Для чернения покрытия использовали разные концентрации трех видов кислотного раствора:

- азотная кислота;
- серная кислота + азотная кислота;
- азотная кислота + серная кислота + перманганат калия.

Показано, что азотная кислота (9 М) обеспечивает наибольшее значение коэффициента светопоглощения ( $\sim 0,995$ ). Анализ поверхности показал, что покрытие до травления содержало Ni и P в количестве 93,15 и 6,81 % (по массе) соответственно. После травления покрытие имело более низкое содержание никеля и фосфора: 90,06 и 5,75 % (по массе) соответственно. Кроме того, в нем обнаружены кислород (4,19 % (по массе)), оксиды (NiO, Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и небольшое количество фосфата никеля. Черный цвет обусловлен химическим составом и микроструктурой поверхности полученного покрытия, способного поглощать 99,5 % солнечного света. Поскольку толщина покрытия в результате травления уменьшается, необходимо изначально наносить более толстый слой. Для достижения максимального значения коэффициента светопоглощения оптимальная толщина покрытия после травления должна составлять  $30 \pm 2$  мкм. Полученные электростатические черные покрытия имеют высокую коррозионную стойкость, жаростойкость, устойчивость во влажной среде, адгезию и твердость (575 HV).

Влияние природы и шероховатости подложки на оптические свойства черных никелевых покрытий рассмотрено в многочисленных исследованиях [16, 30, 31]. В работе [32] предложен электролит, состоящий из никеля, сульфата никеля, сульфата никеля-аммония, сульфата цинка и тиоцианата натрия, для электроосаждения черных никелевых покрытий на различные подложки (алюминий, медь и нержавеющая сталь). Изучены необработанные, полированные и подвергшиеся дробеструйной обработке образцы. Показано, что коэффициент светопоглощения зависит от вида обработки поверхности в большей степени, чем от материала подложки. Коэффициент светопоглощения для образцов, подвергнутых дробеструйной обработке, в некоторых случаях достигал 0,93, в то время как для полированных и необработанных покрытий получены более низкие значения.

Связь между продолжительностью процесса осаждения и оптическими свойствами черных никелевых покрытий рассмотрена в работе [33]. Обнаружено, что при увеличении толщины покрытия с 1 до 10 мкм коэффициент светопоглощения снижается с 0,96 до 0,90, тогда как коэффициент теплового излучения возрастает с 0,11 до 0,87. Изменение оптических свойств в зависимости от толщины черного никелевого покрытия также исследовано в работах [23, 30].

В работах [30, 31] изучено электроосаждение черного покрытия системы Ni–Cu на молибденовую фольгу. В работе [30] осаждение проводили из электролита, содержащего нитрат меди и сульфат никеля. Отмечено, что оптические свойства пленок улучшаются с увеличением продолжительности осаждения. Это соответствует результатам, полученным для покрытий системы Ni–Co в исследовании [22]. В работе [31] сплошные селективные покрытия системы Ni–Cu без включений и пор с хорошими оптическими свойствами ( $\alpha = 0,94$  и  $\varepsilon = 0,10$ ) получены из электролита на основе триэтилоламинового комплекса, содержащего пероксодисульфат аммония.

### *Хром и его сплавы*

Черный хром получают электроосаждением из электролитов на основе хромовой кислоты [34], а также при образовании хроматного конверсионного покрытия [35]. Черный хром обеспечивает более высокую коррозионную стойкость, чем черный никель, особенно когда электролит содержит муравьиную кислоту. В работе [35] показано, что модификация поверхности с помощью адсорбированного слоя муравьиной кислоты значительно повышает стойкость покрытия к локальной коррозии.

В результате хроматирования цинковых пластин получают защитно-декоративные покрытия или покрытия, повышающие теплопоглощение. В настоящее время они применяются в оптических устройствах, кино- и фототехнике, в качестве заменителей красок и т. д. [36].

Черные хроматные конверсионные покрытия на цинковых подложках можно получить химическими методами, т. е. погружением в раствор хроматирования, в результате чего преимущественно на поверхности образуются пленки зеленого или оливкового цвета. Такие покрытия помимо хроматов обычно содержат ионы серебра или меди, необходимые для достижения эффекта чернения.

Черные хроматные конверсионные покрытия наносили на подложки из Zn и Co погружением в раствор хроматирования [35]. Подслои Zn и Zn-Co предварительно наносили гальваническим методом, и изготавливали покрытие с содержанием кобальта 0,25–1,0 %. Проведен сравнительный анализ спектров отражения черных покрытий, полученных в различных растворах хроматирования. Показано, что покрытие, осажденное на подслои цинка без кобальта, имеет коэффициент светопоглощения 0,88–0,90, в присутствии кобальта в количестве <1 % (по массе)  $\alpha$  достигает 0,90–0,93. Такие высокие значения  $\alpha$  объясняются наличием включений, которые проникают из металлического подслоя в хроматную пленку. Кроме того, показано, что наличие Co увеличивает коррозионную стойкость покрытия.

В работе [37] электролит черного хроматирования получали в соответствии с рецептурой, приведенной в работе [38], и модифицировали добавлением  $KNO_3$  в качестве окислителя. Хром наносили потенциодинамическими и потенциостатическими методами. Анализ черных хроматных покрытий показал, что большинство внешних слоев формируются в основном из  $Cr_2O_3$  с селективностью 3,41. После термической обработки образцов количество  $Cr_2O_3$  во внешних слоях увеличивается, а селективность достигает 3,91.

В исследовании [39] изучено влияние термического отжига на свойства черных хроматных покрытий. В работе [40] оптимизирован состав электролита для нанесения покрытий системы Cr-Fe. Разработан слабокислый электролит на основе триоксида хрома и фосфата железа. Полученные черные покрытия имеют высокий коэффициент светопоглощения (0,97) за счет образования интерфаз Cr/Fe и фрагмента FeO в матрице покрытия, которые усиливают черный цвет покрытий. Селективность полученного покрытия составляет 10,7. Отжиг при температуре 400 °C приводит к превращению гидроксида хрома, присутствующего на поверхности, в оксид хрома ( $Cr_2O_3$ ). Следует отметить, что доказательств образования металлического хрома не обнаружено.

Хотя шестивалентный хром является превосходным ингибитором коррозии, он признан высокотоксичным и канцерогенным соединением [41]. Поскольку трехвалентный хром не токсичен и обладает аналогичными характеристиками, его можно использовать в качестве альтернативы.

В работе [42] представлен состав для осаждения черных хромсодержащих покрытий на основе хромитного электролита хроматирования. Особое внимание уделено анализу влияния гексафторокремниевой кислоты ( $H_2SiF_6$ ) в растворе хроматирования

на свойства хроматных покрытий. Как оказалось, сложно получить черное покрытие, не содержащее  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ . Концентрация гексафторокремниевой кислоты не должна превышать 8 г/л. Полученное покрытие представляет собой смесь  $\text{Cr}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrO}_3$  и  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ , коэффициент светопоглощения составляет 0,97. Кроме того, добавление кобальта повышает выход по току и уровень оптических свойств покрытия. Термическая обработка этого покрытия при температуре  $<400^\circ\text{C}$  незначительно влияет на светопоглощающие свойства.

### **Черные покрытия, получаемые осаждением из газовой фазы**

Черные покрытия, получаемые методами вакуумного осаждения или плазмохимического осаждения из газовой фазы, широко используются в декоративных целях. Среди них наиболее распространены покрытия на основе соединений углерода и титана.

#### ***Черные покрытия на основе титана***

Покрытия из  $\text{Ti}(\text{C}, \text{O})$ , получаемые с использованием  $\text{CO}_2$  в качестве реакционного газа, имеют черный цвет, но обладают низкой твердостью (400 HV) и износостойкостью. Механические свойства покрытий можно улучшить, используя соединения  $\text{TiAl}(\text{C}, \text{O})$  и  $\text{TiAl}(\text{C}, \text{O}, \text{N})$ , обладающие твердостью 1330 и 1120–1730 HV (в зависимости от содержания азота) соответственно [43]. В работе [44] показано, что покрытия  $\text{Ti}(\text{C}, \text{O}, \text{N})$ , изготовленные методом вакуумного осаждения, позволяют получать разные оттенки черного в декоративных целях. Для изготовления покрытия образец из титана подвергали ионному распылению в газовой смеси аргона, кислорода, азота и ацетилена в качестве источника углерода. При увеличении содержания кислорода в покрытии карбид титана меняет цвет с металлического темно-серого на более темный вплоть до черного.

#### ***Черные покрытия на основе углерода***

Алмазоподобные углеродные покрытия также используют в качестве черных покрытий. Они обладают высоким значением твердости (2000–10000 HV), низким коэффициентом трения (0,1–0,2) и высокой химической устойчивостью [45–51].

Алмазоподобные углеродные покрытия состоят из смеси графита (с  $\text{sp}^2$ -гибридизацией) и алмаза (с  $\text{sp}^3$ -гибридизацией). Их свойства могут сильно варьироваться в зависимости от соотношения содержаний углерода в форме графита и алмаза, а также от массовой доли водорода. Их механические свойства, как правило, резко ухудшаются при воздействии температуры  $>400^\circ\text{C}$ : твердость снижается из-за дегидрирования материала и изменения типа гибридизации атомов углерода (из  $\text{sp}^3$  в  $\text{sp}^2$ ) [52].

В работе [53] получено наноструктурированное многослойное покрытие, которое сочетает мягкий слой гидрированного аморфного углерода ( $\text{aC:H}$ ), полученный методом плазмохимического осаждения из газовой фазы, и твердый слой  $\text{Cr/Cr}_{3-x}\text{C}_x$ , сформированный методом вакуумного осаждения. В зависимости от толщины верхнего слоя хрома данный метод позволяет получать цвет покрытия от черного до металлического. Покрытия черного цвета получены при толщине слоя хрома 5 нм, более толстый слой  $\text{Cr}$  ( $>30$  нм) позволяет изготовить покрытия металлического цвета. При толщине обоих слоев 7–8 нм покрытие имеет оптимальные свойства. Твердость такого покрытия превышает твердость нержавеющей стали в 3 раза. Оно обладает высокой адгезией вследствие высокого модуля упругости и не изменяет цвет после 3 мес хранения на воздухе.

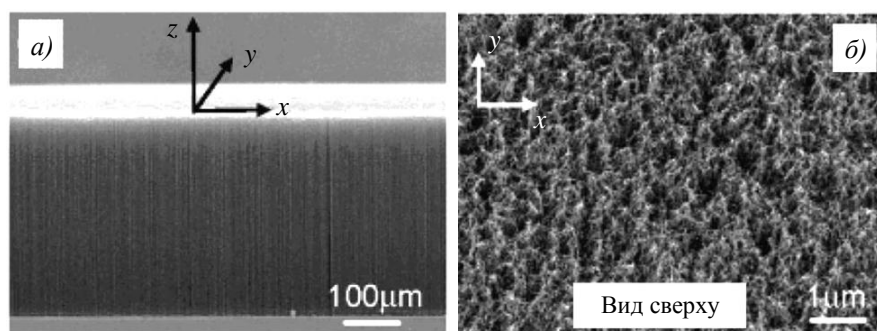


Рис. 4. Вертикально ориентированные углеродные нанотрубки при разном увеличении (растровая электронная микроскопия)

На основе углерода из газовой фазы получен самый черный материал в мире, известный на момент открытия (2008 г.). Данное покрытие обладает коэффициентом светопоглощения 0,9995 при общей отражательной способности 0,045 %. Он синтезирован из углеродных нанотрубок со средним диаметром 8–10 нм, полученных методом химического парофазного осаждения [54]. Нанотрубки расположены параллельно друг другу и перпендикулярно подложке, имеют низкую поверхностную плотность, т. е. не прилегают друг к другу (рис. 4). Для достижения максимального коэффициента поглощения поверхность углеродного покрытия делали шероховатой и неоднородной (рис. 4, б).

### Заключения

Анализ научно-технической литературы показал, что самым распространенным типом гальванических светопоглощающих покрытий является черный хром. Черное хромирование позволяет получить покрытия с высокой износостойкостью, однако требует применения хроматов, которые являются канцерогенами. Ведутся активные разработки черных покрытий на основе никеля и других металлов с целью замены черного хрома.

Основным типом химических покрытий можно считать покрытия системы Ni–P. Они легко наносятся, обладают хорошей износостойкостью и уникальными магнитными свойствами, однако уступают гальваническим покрытиям по селективности.

В настоящее время активно развиваются газофазные методы, позволяющие получить покрытия с очень высоким коэффициентом светопоглощения. Однако такие покрытия обладают низкой износостойкостью, поэтому применяются в основном в декоративных целях.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Каримова С.А., Семенова Л.В. Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком // Коррозия: материалы, защита. 2011. № 12. С. 1–7.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2. С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Takadoun J. Black coatings: a review // European Physical Journal: Applied Physics. 2010. Vol. 3. P. 52.
4. Меркулова Ю.И., Куршев Е.В., Вдовин А.И., Андреева Н.П. Микроструктурные и электрохимические исследования лакокрасочных покрытий в условиях натуральных климатических испытаний тропического климата Северной Америки // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.

5. Brown R.J.C., Brewer P.J., Milton M.J.T. The physical and chemical properties of electroless nickel–phosphorus alloys and low reflectance nickel–phosphorus black surfaces // *Journal of Materials Chemistry*. 2002. Vol. 12. No. 9. P. 2749–2754.
6. Meier S.R. Comparisons of the optical, surface, and constituent properties of morphologically variant black materials // *Optical Systems Degradation, Contamination, and Stray Light: Effects, Measurements, and Control: the SPIE 49th Annual Meeting*. Denver: SPIE, 2004. Vol. 5526. P. 164–175.
7. Cui G., Li N., Li D. et al. The physical and electrochemical properties of electroless deposited nickel–phosphorus black coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. No. 24. P. 6808–6814.
8. Saxena V., Rani R.U., Sharma A.K. Studies on ultra high solar absorber black electroless nickel coatings on aluminum alloys for space application // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. No. 3–4. P. 855–862.
9. Patel S.N., Inal O.T. Optimization and microstructural analysis of black-zinc-coated aluminum solar collector coatings // *Thin Solid Films*. 1984. Vol. 113. No. 1. P. 47–57.
10. Monteiro F.J., Oliveira F., Reis R., Paiva O. The morphology and optical characteristics of black solar selective coatings // *Plating and Surface Finishing*. 1992. Vol. 79. No. 1. P. 46–52.
11. Li G., Niu L., Lian J., Jiang Z. A black phosphate coating for C1008 steel // *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 176. No. 2. P. 215–221.
12. Barrera E., Palomar M., Batina N., González I. Formation mechanisms and characterization of black and white cobalt electrodeposition onto stainless steel // *Journal of The Electrochemical Society*. 2000. Vol. 147. No. 5. P. 1787–1796.
13. Gabe D.R., Gould S.E. Black molybdate conversion coatings // *Surface and Coatings Technology*. 1988. Vol. 35. No. 1–2. P. 79–91.
14. Jahan F., Smith B.E. Electrical properties of electrodeposited molybdenum black coatings // *Solar energy materials*. 1990. Vol. 20. No. 3. P. 215–224.
15. Wackelgard E. Characterization of black nickel solar absorber coatings electroplated in a nickel chlorine aqueous solution // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1998. Vol. 56. No. 1. P. 35–44.
16. Lira-Cantu M., Sabio A.M., Brustenga A., Gomez-Romero P. Electrochemical deposition of black nickel solar absorber coatings on stainless steel AISI316L for thermal solar cells // *Solar energy materials and solar cells*. 2005. Vol. 87. No. 1–4. P. 685–694.
17. Mehra N.C., Sharma S.K. Role of substrate preparation in the optical performance of solar selective black nickel coatings // *Journal of materials science letters*. 1989. Vol. 8. No. 6. P. 707–708.
18. Cathro K.J. Formation of nickel-black selective surfaces by a conversion coating process // *Solar Energy Materials*. 1981. Vol. 5. No. 3. P. 317–335.
19. Ibrahim M.A.M. Black nickel electrodeposition from a modified Watts bath // *Journal of Applied Electrochemistry*. 2006. Vol. 36. P. 295–301.
20. Koltun M., Gukhman G., Gavrilina A. Stable selective coating «black nickel» for solar collector surfaces // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1994. Vol. 33. No. 1. P. 41–44.
21. Peterson R.E., Ramsey J.W. Thin film coatings in solar-thermal power systems // *Journal of Vacuum Science and Technology*. 1975. Vol. 12. No. 1. P. 174–181.
22. Karupiah N., John S., Natarajan S., Sivan V. Characterization of electrodeposited Nickel-Cobalt selective black coatings-scanning electron microscopic studies // *Bulletin of electrochemistry*. 2002. Vol. 18. No. 7. P. 295–298.
23. Kerr C., Barker D., Walsh F.C. Electroless Deposition of Metals // *Transactions of the IMF*. 2001. Vol. 79. P. 41–46.
24. Dennis J.K., Such T.E. Nickel and chromium plating. Elsevier, 1993. 449 p.
25. Tulsi S.S. Properties of electroless nickel // *Transactions of the IMF*. 1986. Vol. 64. No. 1. P. 73–76.
26. Court S.W., Barker B.D., Walsh F.C. Electrochemical measurements of electroless nickel coatings on zincated aluminium substrates // *Transactions of the IMF*. 2000. Vol. 78. No. 4. P. 157–162.

27. Gavrilov G.G. Chemical (electroless) nickel-plating. Portcullis Press, 1979. 500 p.
28. Johnson C.E. Black electroless nickel surface morphologies with extremely high light absorption capacity // *Metal Finishing*. 1980. Vol. 78. No. 7. P. 21–24.
29. Sharma A.K., Bhojraj H., Kaila V.K., Narayanamurthy H. Anodizing and inorganic black coloring of aluminum alloys for space applications // *Metal Finishing*. 1997. Vol. 95. No. 12. P. 14–20.
30. Aravinda C.L., Bera P., Jayaram V. et al. Characterization of electrochemically deposited Cu–Ni black coatings // *Materials research bulletin*. 2002. Vol. 37. No. 3. P. 397–405.
31. Aravinda C.L., Mayanas S.M., Bera P. et al. XPS and XAES investigations of electrochemically deposited Cu–Ni solar selected black coatings on molybdenum substrate // *Journal of materials science letters*. 2002. Vol. 21. P. 205–208.
32. Executive Summary: Black Nickel Coating. URL: <http://cs.wpi.edu/~dfinkel/Sponsor/CM1.doc> (дата обращения: 15.02.2024).
33. Black nickel coating for spacecraft. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1989mala.iafcS....C> (дата обращения: 15.02.2024).
34. Surviliene S., Orlovskaja L., Biallozor S. Black chromium electrodeposition on electrodes modified with formic acid and the corrosion resistance of the coating // *Surface and Coatings Technology*. 1999. Vol. 122. No. 2–3. P. 235–241.
35. Nikolova M., Harizanov O., Steftchev P. et al. Black chromate conversion coatings on electrodeposited zinc // *Surface and Coatings Technology*. 1988. Vol. 34. No. 4. P. 501–514.
36. Сердцелюбова А.С., Меркулова Ю.И., Загора А.Г., Куршев Е.В. Исследование параметров отверждения и защитной способности системы покрытия типа «база/лак» для окраски внешней поверхности авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-93-104.
37. Aguilar M., Barrera E., Palomar-Pardave M. et al. Characterization of black and white chromium electrodeposition films: surface and optical properties // *Journal of non-crystalline solids*. 2003. Vol. 329. No. 1–3. P. 31–38.
38. Smith G.B., Zajac G., Ignatiev A., Rabalais J.W. Surface composition of solar selective black chrome films as determined by SIMS // *Surface Science*. 1982. Vol. 114. No. 2–3. P. 614–626.
39. Anandan C., Grips V.K.W., Rajam K.S. et al. Investigation of surface composition of electrodeposited black chrome coatings by X-ray photoelectron spectroscopy // *Applied surface science*. 2002. Vol. 191. No. 1–4. P. 254–260.
40. Karthikeyan S., Jeeva P.A., Raja K. et al. An eco-friendly process on the improvement of hardness and corrosion resistance characteristics of trivalent hard chromium electrodeposition // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5. No. 5. P. 13085–13089.
41. Фомина М.А., Волков И.А., Вдовин А.И., Ямщиков Е.И. Исследование защитной способности анодно-оксидного покрытия с экологически улучшенной технологией наполнения // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.
42. Hamid Z.A. Electrodeposition of black chromium from environmentally electrolyte based on trivalent chromium salt // *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 203. No. 22. P. 3442–3449.
43. Takadom J. *Nanomatériaux, traitement et fonctionnalisation des surfaces*. New Castle: Hermes, 2008. 420 p.
44. Chappé J.M., Vaz F., Cunha L. et al. Development of dark Ti (C, O, N) coatings prepared by reactive sputtering // *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 203. No. 5–7. P. 804–807.
45. Bull S.J. Tribology of carbon coatings: DLC, diamond and beyond // *Diamond and related materials*. 1995. Vol. 4. No. 5–6. P. 827–836.
46. Grill A. Plasma-deposited diamondlike carbon and related materials // *IBM Journal of Research and Development*. 1999. Vol. 43. No. 1.2. P. 147–162.
47. Le H.T., Zaidi H., Paulmier D., Voumard P. Transformation of sp<sup>3</sup> to sp<sup>2</sup> sites of diamond like carbon coatings during friction in vacuum and under water vapour environment // *Thin Solid Films*. 1996. Vol. 290. P. 126–130.

48. Liu Y., Erdemir A., Meletis E.I. A study of the wear mechanism of diamond-like carbon films // *Surface and Coatings Technology*. 1996. Vol. 82. No. 1–2. P. 48–56.
49. Каблов Е.Н., Соловьянич Л.В., Кондрашов С.В. и др. Электропроводящие гидрофобные полимерные композиционные материалы на основе окисленных углеродных нанотрубок, модифицированных теломерами тетрафторэтилена // *Российские нанотехнологии*. 2016. Т. 11. № 11–12. С. 91–97.
50. Каблов Е.Н., Пыхтин А.А., Сорокин А.Е., Ларионов С.А. Влияние способа функционализации углеродных нанотрубок на технологические и эксплуатационные свойства филаментов для FDM-печати на основе АБС-пластика // *Российские нанотехнологии*. 2022. Т. 17. № 6. С. 745–752.
51. Севальнев Г.С., Якушева Н.А., Коробова Е.Н., Дульнев К.В. Исследование кинетики диффузионного насыщения высокохромистых сталей мартенситного класса после различных видов химико-термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-3-14.
52. Takadom J., Rauch J.Y., Cattenot J.M., Martin N. Comparative study of mechanical and tribological properties of CN<sub>x</sub> and DLC films deposited by PECVD technique // *Surface and Coatings Technology*. 2003. Vol. 174. P. 427–433.
53. Andritschky M., Atfeh M., Pischow K. Multilayered decorative aC:H/CrC coating on stainless steel // *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 203. No. 8. P. 952–956.
54. Yang Z.P., Ci L., Bur J.A. et al. Experimental observation of an extremely dark material made by a low-density nanotube array // *Nano letters*. 2008. Vol. 8. No. 2. P. 446–451.

#### References

1. Kablov E.N., Karimova S.A., Semenova L.V. Corrosion activity of carbon fiber reinforced plastics and protection of metal load-bearing structures in contact with carbon fiber reinforced plastics. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2011, no. 12, pp. 1–7.
2. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Авиационные материалы и технологии*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Takadom J. Black coatings: a review. *European Physical Journal: Applied Physics*, 2010, vol. 3, p. 52.
4. Merkulova Yu.I., Kurshev E.V., Vdovin A.I., Andreeva N.P. Microstructural and electrochemical studies of paint coatings under natural climate tests of tropical climate of North America. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
5. Brown R.J.C., Brewer P.J., Milton M.J.T. The physical and chemical properties of electroless nickel–phosphorus alloys and low reflectance nickel–phosphorus black surfaces. *Journal of Materials Chemistry*, 2002, vol. 12, no. 9, pp. 2749–2754.
6. Meier S.R. Comparisons of the optical, surface, and constituent properties of morphologically variant black materials. *Optical Systems Degradation, Contamination, and Stray Light: Effects, Measurements, and Control: the SPIE 49th Annual Meeting*. Denver: SPIE, 2004, vol. 5526, pp. 164–175.
7. Cui G., Li N., Li D. et al. The physical and electrochemical properties of electroless deposited nickel–phosphorus black coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, no. 24, pp. 6808–6814.
8. Saxena V., Rani R.U., Sharma A.K. Studies on ultra high solar absorber black electroless nickel coatings on aluminum alloys for space application. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201, no. 3–4, pp. 855–862.
9. Patel S.N., Inal O.T. Optimization and microstructural analysis of black-zinc-coated aluminum solar collector coatings. *Thin Solid Films*, 1984, vol. 113, no. 1, pp. 47–57.

10. Monteiro F.J., Oliviera F., Reis R., Paiva O. The morphology and optical characteristics of black solar selective coatings. *Plating and Surface Finishing*, 1992, vol. 79, no. 1, pp. 46–52.
11. Li G., Niu L., Lian J., Jiang Z. A black phosphate coating for C1008 steel. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 176, no. 2, pp. 215–221.
12. Barrera E., Palomar M., Batina N., González I. Formation mechanisms and characterization of black and white cobalt electrodeposition onto stainless steel. *Journal of The Electrochemical Society*, 2000, vol. 147, no. 5, pp. 1787–1796.
13. Gabe D.R., Gould S.E. Black molybdate conversion coatings. *Surface and Coatings Technology*, 1988, vol. 35, no. 1–2, pp. 79–91.
14. Jahan F., Smith B.E. Electrical properties of electrodeposited molybdenum black coatings. *Solar energy materials*, 1990, vol. 20, no. 3, pp. 215–224.
15. Wackelgard E. Characterization of black nickel solar absorber coatings electroplated in a nickel chlorine aqueous solution. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1998, vol. 56, no. 1, pp. 35–44.
16. Lira-Cantu M., Sabio A.M., Brustenga A., Gomez-Romero P. Electrochemical deposition of black nickel solar absorber coatings on stainless steel AISI316L for thermal solar cells. *Solar energy materials and solar cells*, 2005, vol. 87, no. 1–4, pp. 685–694.
17. Mehra N.C., Sharma S.K. Role of substrate preparation in the optical performance of solar selective black nickel coatings. *Journal of materials science letters*, 1989, vol. 8, no. 6, pp. 707–708.
18. Cathro K.J. Formation of nickel-black selective surfaces by a conversion coating process. *Solar Energy Materials*, 1981, vol. 5, no. 3, pp. 317–335.
19. Ibrahim M.A.M. Black nickel electrodeposition from a modified Watts bath. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2006, vol. 36, pp. 295–301.
20. Koltun M., Gukhman G., Gavrilina A. Stable selective coating «black nickel» for solar collector surfaces. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1994, vol. 33, no. 1, pp. 41–44.
21. Peterson R.E., Ramsey J.W. Thin film coatings in solar-thermal power systems. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1975, vol. 12, no. 1, pp. 174–181.
22. Karupiah N., John S., Natarajan S., Sivan V. Characterization of electrodeposited Nickel-Cobalt selective black coatings-scanning electron microscopic studies. *Bulletin of Electrochemistry*, 2002, vol. 18, no. 7, pp. 295–298.
23. Kerr C., Barker D., Walsh F.C. Electroless Deposition of Metals. *Transactions of the IMF*, 2001, vol. 79, pp. 41–46.
24. Dennis J.K., Such T.E. *Nickel and chromium plating*. Elsevier, 1993, 449 p.
25. Tulsi S.S. Properties of electroless nickel. *Transactions of the IMF*, 1986, vol. 64, no. 1, pp. 73–76.
26. Court S.W., Barker B.D., Walsh F.C. Electrochemical measurements of electroless nickel coatings on zincated aluminium substrates. *Transactions of the IMF*, 2000, vol. 78, no. 4, pp. 157–162.
27. Gavrilov G.G. *Chemical (electroless) nickel-plating*. Portcullis Press, 1979, 500 p.
28. Johnson C.E. Black electroless nickel surface morphologies with extremely high light absorption capacity. *Metal Finishing*, 1980, vol. 78, no. 7, pp. 21–24.
29. Sharma A.K., Bhojraj H., Kaila V.K., Narayanamurthy H. Anodizing and inorganic black coloring of aluminum alloys for space applications. *Metal Finishing*, 1997, vol. 95, no. 12, pp. 14–20.
30. Aravinda C.L., Bera P., Jayaram V. et al. Characterization of electrochemically deposited Cu–Ni black coatings. *Materials Research Bulletin*, 2002, vol. 37, no. 3, pp. 397–405.
31. Aravinda C.L., Mayanas S.M., Bera P. et al. XPS and XAES investigations of electrochemically deposited Cu–Ni solar selected black coatings on molybdenum substrate. *Journal of materials science letters*, 2002, vol. 21, pp. 205–208.
32. *Executive Summary: Black Nickel Coating*. Available at: <http://cs.wpi.edu/~dfinkel/Sponsor/CM1.doc> (accessed: February 15, 2024).
33. *Black nickel coating for spacecraft*. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1989mala.iafcS...C> (accessed: February 15, 2024).

34. Surviliene S., Orlovskaja L., Biallozor S. Black chromium electrodeposition on electrodes modified with formic acid and the corrosion resistance of the coating. *Surface and Coatings Technology*, 1999, vol. 122, no. 2–3, pp. 235–241.
35. Nikolova M., Harizanov O., Steftchev P. et al. Black chromate conversion coatings on electrodeposited zinc. *Surface and Coatings Technology*, 1988, vol. 34, no. 4, pp. 501–514.
36. Serdtselyubova A.S., Merkulova Yu.I., Zagora A.G., Kurshev E.V. Research of film-forming parameters and protective properties of basecoat/clearcoat system. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-93-104.
37. Aguilar M., Barrera E., Palomar-Pardave M. et al. Characterization of black and white chromium electrodeposition films: surface and optical properties. *Journal of non-crystalline solids*, 2003, vol. 329, no. 1–3, pp. 31–38.
38. Smith G.B., Zajac G., Ignatiev A., Rabalais J.W. Surface composition of solar selective black chrome films as determined by SIMS. *Surface Science*, 1982, vol. 114, no. 2–3, pp. 614–626.
39. Anandan C., Grips V.K.W., Rajam K.S. et al. Investigation of surface composition of electrodeposited black chrome coatings by X-ray photoelectron spectroscopy. *Applied surface science*, 2002, vol. 191, no. 1–4, pp. 254–260.
40. Karthikeyan S., Jeeva P.A., Raja K. et al. An eco-friendly process on the improvement of hardness and corrosion resistance characteristics of trivalent hard chromium electrodeposition. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 5, pp. 13085–13089.
41. Fomina M.A., Volkov I.A., Vdovin A.I., Yamshchikov E.I. Study of protective capacity anodic oxide coating with environmental friendly improved filling technology. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.
42. Hamid Z.A. Electrodeposition of black chromium from environmentally electrolyte based on trivalent chromium salt. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 203, no. 22, pp. 3442–3449.
43. Takadom J. *Nanomatériaux, traitement et fonctionnalisation des surfaces*. New Castle: Hermes, 2008, 420 p.
44. Chappé J.M., Vaz F., Cunha L. et al. Development of dark Ti (C, O, N) coatings prepared by reactive sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 203, no. 5–7, pp. 804–807.
45. Bull S.J. Tribology of carbon coatings: DLC, diamond and beyond. *Diamond and related materials*, 1995, vol. 4, no. 5–6, pp. 827–836.
46. Grill A. Plasma-deposited diamondlike carbon and related materials. *IBM Journal of Research and Development*, 1999, vol. 43, no. 1.2, pp. 147–162.
47. Le H.T., Zaidi H., Paulmier D., Voumard P. Transformation of  $sp^3$  to  $sp^2$  sites of diamond like carbon coatings during friction in vacuum and under water vapour environment. *Thin Solid Films*, 1996, vol. 290, pp. 126–130.
48. Liu Y., Erdemir A., Meletis E.I. A study of the wear mechanism of diamond-like carbon films. *Surface and Coatings Technology*, 1996, vol. 82, no. 1–2, pp. 48–56.
49. Kablov E.N., Solovyanchik L.V., Kondrashov S.V. et al. Electrically conductive hydrophobic polymer composite materials based on oxidized carbon nanotubes modified with tetrafluoroethylene telomers. *Rossiyskie nanotekhnologii*, 2016, vol. 11, no. 11–12, pp. 91–97.
50. Kablov E.N., Pykhtin A.A., Sorokin A.E., Larionov S.A. The influence of the method of functionalization of carbon nanotubes on the technological and operational properties of filaments for FDM printing based on ABS plastic. *Rossiyskiye nanotekhnologii*, 2022, vol. 17, no. 6, pp. 745–752.
51. Sevalnev G.S., Yakusheva N.A., Korobova E.N., Dulnev K.V. Study of the diffusion saturation kinetics of high-chromium carbon steels of the martensitic class after various types of chemical-heat treatment. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-3-14.

52. Takadoun J., Rauch J.Y., Cattenot J.M., Martin N. Comparative study of mechanical and tribological properties of CN<sub>x</sub> and DLC films deposited by PECVD technique. *Surface and Coatings Technology*, 2003, vol. 174, pp. 427–433.
53. Andritschky M., Atfeh M., Pischow K. Multilayered decorative aC:H/CrC coating on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 203, no. 8, pp. 952–956.
54. Yang Z.P., Ci L., Bur J.A. et al. Experimental observation of an extremely dark material made by a low-density nanotube array. *Nano letters*, 2008, vol. 8, no. 2, pp. 446–451.

### *Информация об авторах*

**Толмачев Ян Вячеславович**, аспирант, РХТУ им. Д.И. Менделеева, pochta@muctr.ru

**Абрашов Алексей Александрович**, доцент, к.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева, pochta@muctr.ru

**Заварзин Семен Витальевич**, ведущий инженер, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Ваграмян Тигран Ашотович**, заведующий кафедрой, д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева, pochta@muctr.ru

**Князев Андрей Вадимович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Медынская Анна Владимировна**, магистрант, РХТУ им. Д.И. Менделеева, pochta@muctr.ru

### *Information about the authors*

**Yan V. Tolmachev**, Postgraduate Student, D.I. Mendeleev Russian State Technical University, pochta@muctr.ru

**Aleksei A. Abrashov**, Associate Professor, Candidate of Sciences (Tech.), D.I. Mendeleev Russian State Technical University, pochta@muctr.ru

**Semyon V. Zavarzin**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Tigran A. Vagramyan**, Head of Department, Doctor of Sciences (Tech.), D.I. Mendeleev Russian State Technical University, pochta@muctr.ru

**Andrey V. Knayzev**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Anna V. Medynskaya**, Master's Student, D.I. Mendeleev Russian State Technical University, pochta@muctr.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.03.2024.

The article was submitted 21.03.2024; approved and accepted for publication after reviewing 25.03.2024.