

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.357.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-37-46



ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ ТИТАНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННОГО ГАЛЬВАНИЧЕСКИМ СПОСОБОМ С ДИСКРЕТНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ВРЕМЯТОКОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ХРОМИРОВАНИЯ

Галимов Д.М., Ардашев Д.В., Дегтярева-Кашутина А.С.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Аннотация. Нанесение гальванического хромового покрытия позволяет расширить области применения титановых деталей, например для конструкций морских газонефтяных платформ. Технология электрохимического осаждения хрома на поверхность титановых деталей имеет в своем основании особые подходы, заключающиеся в подготовке поверхности, использовании специальных составов электролитов, в создании токопроводящей пленки на поверхности детали. Ранее были описаны и внедрены технологии нанесения хромового покрытия на наружные и внутренние поверхности гидроцилиндров, изготовленных из стальных сплавов. В данной работе приведены результаты исследования качества хромового покрытия на титановых деталях, полученного с применением указанных ранее подходов при реализации технологий гальванического хромирования, внедренных для стальных деталей. Образцы, представленные для исследования, представляют собой диски, вырезанные из стержней из титанового сплава ВТ22 с нанесенным хромовым покрытием, полученным на установке гальванического осаждения хрома при четырех режимах. Представлены результаты исследования микротвердости хромового покрытия и материала основы деталей. Исследована морфология покрытий и их микроструктура. Для некоторых образцов определен слой окисленного материала основы при неплотном прилегании хромового покрытия к титановой детали. Для других образцов определено плотное прилегание и равномерное распределение покрытия по поверхности титанового сплава. Вероятной причиной присутствия подобного промежуточного слоя является применение режима «реверса» – обратного тока. Заключено, что микроструктура хромового покрытия определяется режимом электрохимического осаждения, при этом ступенчатое изменение плотности тока способствует формированию слоистой структуры покрытия.

Ключевые слова: электролитическое хромирование, титан, электролит, потенциал, плотность тока

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-29-00418, <https://rscf.ru/project/22-29-00418>.

© Галимов Д.М., Ардашев Д.В., Дегтярева-Кашутина А.С., 2023

Для цитирования

Галимов Д.М., Ардашев Д.В., Дегтярева-Кашутина А.С. Исследование качества хромового покрытия титановых деталей, полученного гальваническим способом с дискретным изменением времятоковых параметров процесса хромирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 37-46. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-37-46>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDYING THE QUALITY OF A CHROMIUM COATING APPLIED ON TITANIUM PARTS BY ELECTROPLATING WITH DISCRETE CHANGES IN THE TIME AND CURRENT PARAMETERS OF CHROME PLATING

Galimov D.M., Ardashev D.V., Degtyareva-Kashutina A.S.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Abstract. The application of a galvanic chromium coating expands the use of titanium parts, for example, for offshore oil and gas platform structures. The technology of an electrochemical deposition of chromium on the surface of titanium parts is based on special approaches, consisting in the surface preparation, the use of special electrolyte compositions, and the formation of an electrically conductive film on the part surface. We previously described and implemented the technologies for applying chromium on the outer and inner surfaces of hydraulic cylinders made of steel alloys. This paper presents the results of studying the quality of a chromium coating on titanium parts applied by the previously mentioned approaches in the implementation of galvanic chromium plating technologies used for steel parts. The samples presented for the study are discs cut from VT22 titanium alloy rods with the chromium coating applied in an electroplating machine in four modes. The paper presents the studies on microhardness of the chromium coating and the part base material, and the morphology of the coatings and their microstructure. The layer of the oxidized base material was determined for some samples with a loose adhesion of the chromium coating on the titanium part. The other samples had a proper adhesion and a uniform distribution of the coating over the titanium alloy surface. The probable reason for such an intermediate layer is the use of the “reverse” current mode. The authors concluded that the chromium coating microstructure was determined by the electrochemical deposition mode, while the stepwise change in the current density contributed to the formation of a layered structure of the coating.

Keywords: electrolytic chromium plating, titanium, electrolyte, potential, current density

The research was supported by grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-00418, <https://rscf.ru/project/22-29-00418>.

For citation

Galimov D.M., Ardashev D.V., Degtyareva-Kashutina A.S. Studying the Quality of a Chromium Coating Applied on Titanium Parts by Electroplating with Discrete Changes in the Time and Current Parameters of Chrome Plating. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 37-46. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-37-46>

Введение

Нанесение гальванического хромового покрытия является неотъемлемой частью технологии производства деталей с повышенной износостойкостью и превосходными триботехническими свойствами, которые обеспечивают применение хромированных деталей в гидроцилиндрах различного назначения. С другой стороны, титановые сплавы практически не имеют альтернатив в авиастроении при производстве лёгких и прочных деталей. Титановые сплавы VT22, VT22M, VT22И применяются для изготовления деталей и узлов ответственного назначения: сварные конструкции, турбины, штампованные узлы, высоконагруженные детали и конструкции. Указанные сплавы длительно работают при температуре до 400°C и кратковременно до 750°C. Сплав VT22 – свариваемый титановый сплав, для которого характерна высокая прокаливаемость. Указанный сплав широко применяется для изготовления крупногабаритных деталей внутреннего силового набора в отечественном авиастроении (например, балок,

лонжеронов, шпангоутов, нервюр, рельсов закрылков и предкрылков), а также для изготовления крупногабаритных силовых деталей и узлов шасси, в том числе сварных (траверс, балок основных шасси, тормозных рычагов) [1].

Нанесение гальванического хромового покрытия позволяет расширить области применения титановых деталей, например для конструкций морских газонефтяных платформ. Технология электрохимического осаждения хрома на поверхность титановых деталей имеет в своем основании особые подходы, заключающиеся в подготовке поверхности, использовании специальных составов электролитов, в создании токопроводящей пленки на поверхности детали [2].

Ранее были описаны и внедрены технологии нанесения хромового покрытия на наружные [3-5] и внутренние поверхности гидроцилиндров, изготовленных из стальных сплавов [6].

В данной работе приведены результаты исследования качества хромового покрытия на титановых деталях, полученного с применением указанных ранее подходов при реализации тех-

нологий гальванического хромирования, введенных для стальных деталей.

Материалы и методы исследования

Адгезия покрытия, наличие трещин, пористость покрытия и его механические свойства играют ключевую роль в эксплуатационных качествах детали с гальваническим хромовым покрытием [7-9]. Исследование поперечных микрошлифов таких деталей является высокоинформативным методом испытания качества покрытия [5, 10].

Образцы, представленные для исследования, представляют собой диски, вырезанные из титановых стержней с нанесенным хромовым покрытием.

Детали имеют единый чертеж, диаметр, равный 40 мм, длину, равную 280 мм. Исходные титановые детали механически обработаны: детали проходили обработку резцом на токарном станке, а также обработаны с помощью шлифовальной машины с абразивным наждачным полотном с номинальным размером зерна 50-63 мкм. Детали обработаны травлением в соляной кислоте на половину длины с выдержкой 2 ч при 20°C.

Электрохимическое осаждение титана производили в установке согласно патенту [11] с

расстоянием до анода 20 мм при режимах, описанных в табл. 1.

Режимы 1 и 3 проведены с последовательным увеличением плотности тока и выдержкой, время которой указано в соответствующем столбце. Режимы 2 и 4 проведены с предварительным окисляющим приложением обратного тока 50 А и последующим включением гальванического режима на 30 мин. После гальванического процесса титановые детали с хромовым покрытием промыты дистиллированной водой и высушены на воздухе.

Методами пробоподготовки, аналогичными примененным в работе [5], из деталей были получены микрошлифы, готовые для измерения микротвердости и структурных исследований. Измерения микротвердости и исследования морфологии проведены для образцов в радиальном и поперечном резе, при этом результаты исследований покрытий в двух сечениях соответствуют друг другу и представлены в виде усредненных значений.

Полученные результаты и их обсуждение

Исследование микротвердости покрытий.

В табл. 2 представлены результаты исследования микротвердости хромового покрытия и материала основы деталей.

Таблица 1. Время выдержки деталей в четырех режимах гальванического хромирования, мин

Table 1. Holding time of parts in four galvanic chromium plating modes, min

Электрохимические режимы хромирования	Ток, А											Итого, мин
	Реверс	50	75	100	125	150	175	200	225	250	300	
1	–	5	5	5	5	5	5	30	–	–	–	60
2	50А – 25 с	–	–	–	–	–	–	–	–	–	30	30
3	–	–	3	–	3	–	3	–	30	–	–	39
4	50А – 8 с	–	–	–	–	–	–	–	–	30	–	30

Таблица 2. Микротвердость, определенная при анализе сечений титановых деталей с гальваническим хромовым покрытием

Table 2. Microhardness determined by analyzing the sections of titanium parts with a galvanic chromium coating

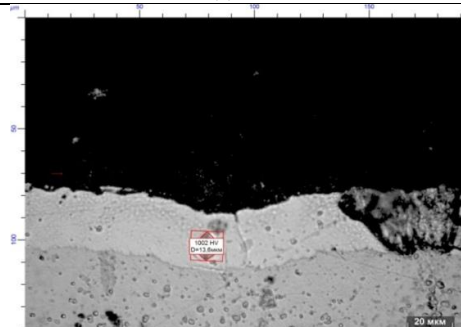
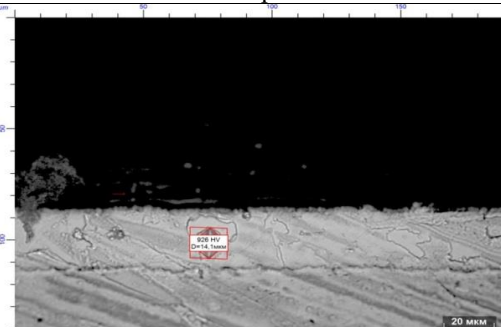
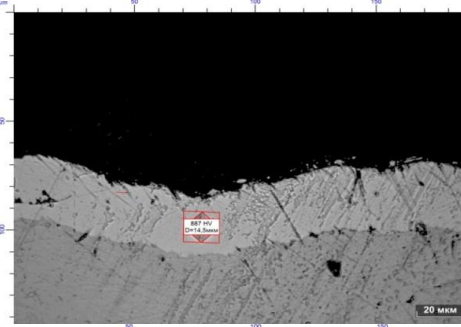
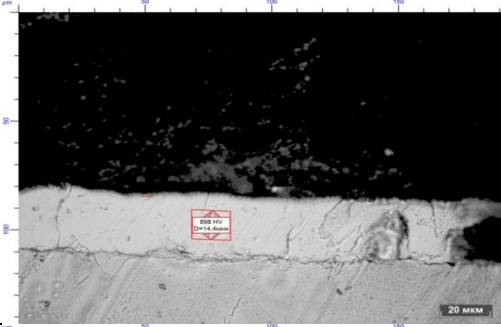
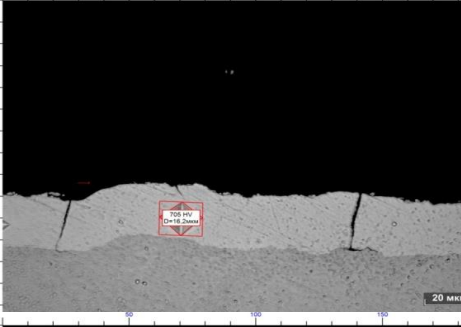
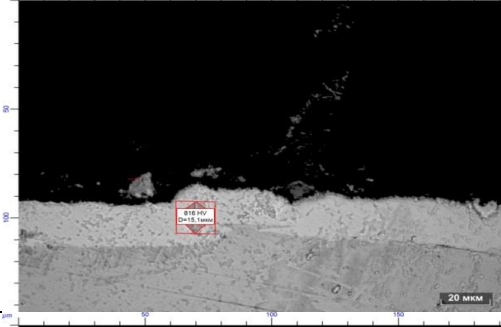
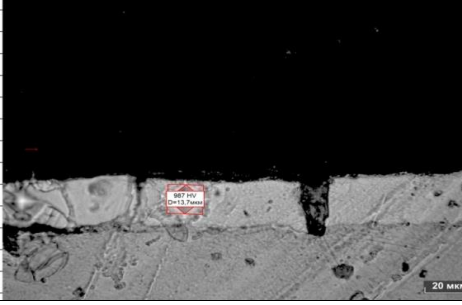
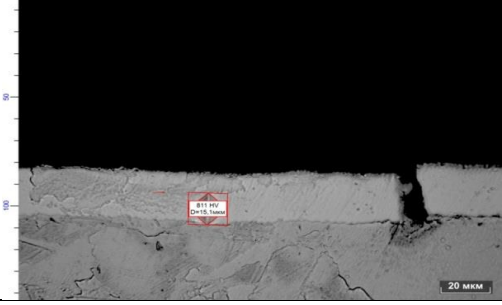
Образец	Сечение	Микротвердость, НВ			
		Покрытие	Стандартное отклонение	Основа	Стандартное отклонение
1	А – вдоль оси	984	45	390	24
	Б – поперечное	888	76	399	18
	Среднее	940	80	395	25
2	А – вдоль оси	810	120	382	19
	Б – поперечное	841	131	418	17
	Среднее	825	130	400	20
3	А – вдоль оси	622	82	385	25
	Б – поперечное	810	70	379	28
	Среднее	720	80	380	30
4	А – вдоль оси	1075	110	380	33
	Б – поперечное	832	120	407	7
	Среднее	950	120	390	30
Средняя твердость материала основы			390	30	

Результаты замеров микротвердости материала основы свидетельствуют о равномерном качестве титанового сплава и непосредственно титановых деталей. Среднее значение для всех образцов соответствует 390 НВ, что в случае сплава ВТ22 является признаком закалки титановых деталей, так как в состоянии поставки твердость титановых прутков ВТ22 – НВ 285 МПа, что соответствует приблизительно НВ 280.

Режимы электрохимического осаждения неочевидным образом повлияли на усредненные значения микротвердости хромового покрытия, что требует дальнейшего изучения.

Исследование морфологии покрытий. Далее приведены изображения оптической инвертированной металлографии для образцов (табл. 3), соответствующих четырем режимам электрохимического осаждения (соответственно цифрам 1-4).

Таблица 3. Фотографии, полученные при измерении микротвердости
Table 3. Photomicrographs taken when measuring microhardness

Образец	Сечение	
	А – вдоль оси	Б – поперечное
1		
2		
3		
4		

Затем образцы были исследованы методами сканирующей (растровой) электронной микроскопии (далее – РЭМ).

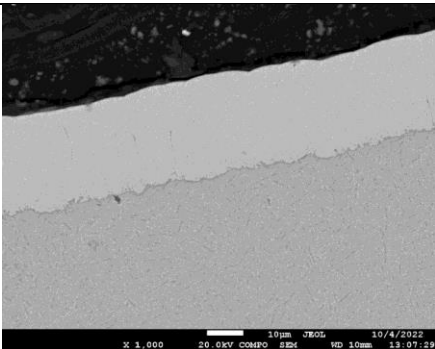
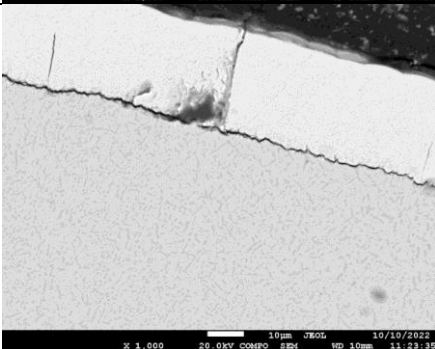
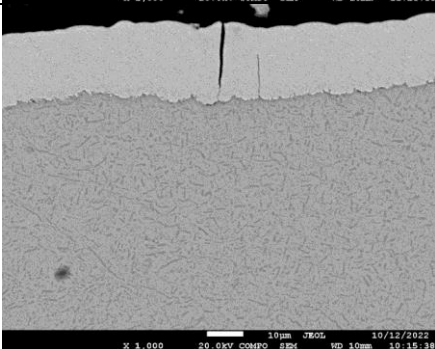
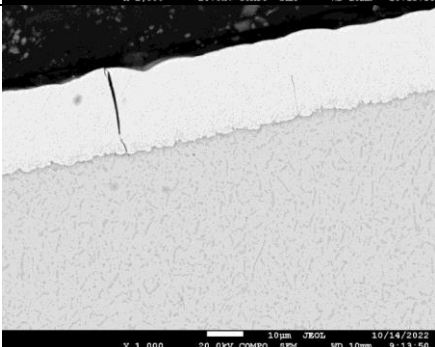
Исследование проведено при ускоряющем напряжении 20 кВ, рабочем расстоянии 10 мм. Изображения РЭМ получены при регистрации

обратно-рассеянных электронов. Примеры изображений поверхности сечений образцов, включающие участки с покрытием, приведены в **табл. 4**.

Характер рельефа материала основы, равно как и рельефа поверхности покрытия, сходен для всех образцов.

Таблица 4. Характерные изображения РЭМ образцов хромового покрытия на титановых деталях при различных режимах электрохимического осаждения

Table 4. Typical SEM images of the samples of the chromium coating on titanium parts in various electrochemical deposition modes

Образец	Характерное изображения РЭМ
1	
2	
3	
4	

Исследование толщины покрытий. Толщина покрытий определена в поперечном сечении. Исследована поверхность сечения, проведены замеры толщины слоя на нескольких участках (не менее 5 шт.) сечения образца в области покрытия, вычислены средние значения по участкам анализа и средние значения толщины покрытия для каждого из образцов. Результаты представлены в табл. 5.

Толщина покрытия составила значения от 22 мкм – в режимах 3 и 4 до 27 и 29 мкм – в режимах 1 и 2 соответственно. Первый режим с постепенным дискретным увеличением силы тока позволил получить достаточно твердое покрытие

с толщиной, равной 27 мкм в среднем.

Наибольшая толщина покрытия характерна для образца 2 с наибольшим значением тока, равным 300 А при выдержке 30 с.

Малое по времени и номиналу силы тока приложение гальванического тока приводит к меньшей толщине покрытия, как в случае режимов 3 и 4, что является подтверждением закона Фарадея.

Исследование микроструктуры покрытия.

На изображении РЭМ представлен участок микрошлифа хромового покрытия образца 1 (рис. 1) на титановой основе, содержащий дефект, который, вероятно, возник при пробоподготовке.

Таблица 5. Размер слоя покрытий, определенный при анализе сечений титановых деталей с гальваническим хромовым покрытием

Table 5. The size of the coating layer determined by analyzing the sections of titanium parts with a galvanic chromium coating

Образец	Усреднение по участку анализа, мкм							Среднее, мкм	Стандартное отклонение
	1	2	3	4	5	6	7		
1	27,0	27,1	26,4	26,9	25,6	28,7	–	26,9	0,9
2	29,0	34,4	28,2	27,9	27,4	26,1	27,0	28,6	2,4
3	19,4	21,4	23,9	22,4	21,0	–	–	21,6	1,4
4	23,7	23,0	23,1	23,3	19,3	18,3	–	21,8	2,0

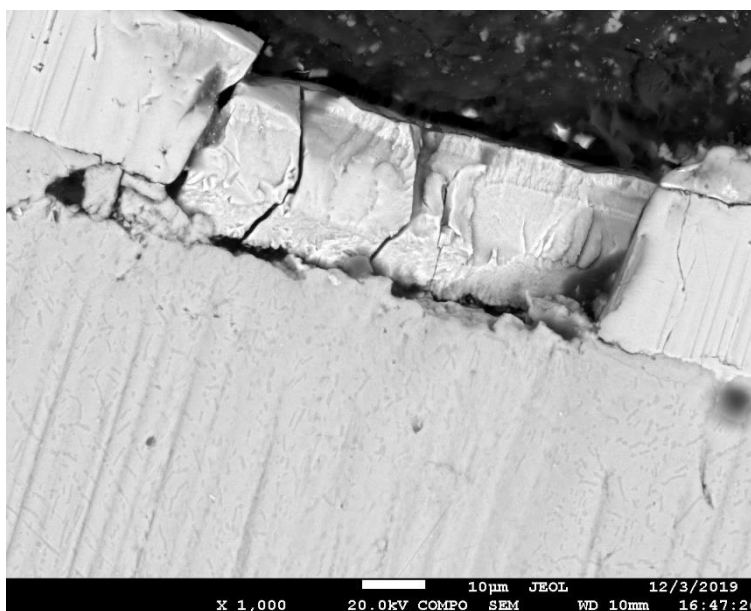


Рис. 1. Образец 1. Участок микрошлифа хромового покрытия

Fig. 1. Sample 1. A part of the polished microspecimen of the chromium coating

Особенностью данного участка является излом хромового покрытия, не затронутый микрошлиф-подготовкой. Различимы слои хромового покрытия: прилегающий к материалу основы – титану, основной (средний) слой, наружный слой хромового покрытия. Данные слои определены косвенно, по изображению РЭМ. Слои хромового покрытия связаны между собой в единый монолитный слой, однако характер рельефа скола слоев различен.

Слои соответствуют режимам гальванического процесса, которые поочередно были применены при нанесении данного покрытия.

Особенностью данного участка является излом хромового покрытия, не затронутый микрошлиф-подготовкой. Различимы слои хромового покрытия: прилегающий к материалу основы – титану, основной (средний) слой, наружный слой хромового покрытия. Данные слои определены косвенно, по изображению РЭМ. Слои хромового покрытия связаны между собой в единый монолитный слой, однако характер рельефа скола слоев различен.

Слои соответствуют режимам гальванического процесса, которые поочередно были применены при нанесении данного покрытия.

Можно заключить, что для образца 1 характерна превосходная адгезия, определяемая визуально методами РЭМ, как полное прилегание материалов покрытия и основы. Покрытие имеет микротрещины от наружной поверхности в глубину, шириной менее 1 мкм, не

приводящие к разрушению и отслоению покрытия. В целом покрытие стоит оценить как сплошное и равномерное.

Поверхность материала основы образца 2 (рис. 2) представляет собой отдельный слой толщиной 6 мкм, полученный, вероятно, при электрохимическом травлении титана в режиме обратного тока. На сколе хромового покрытия возможно определить по крайней мере два слоя, полученные, вероятно, при изменении электрохимического режима нанесения покрытия.

Для образца 2 характерно полное прилегание сплошного хромового покрытия к материалу указанного слоя. В результате измерений микротвердость данного покрытия определена как меньшая, чем при ступенчатом режиме 1, а статистический разброс значений оказался в два раза большим (стандартное отклонение в 120-130 единиц твердости при 45-70 единицах для образца 1). Возможной причиной небольшой разницы в значениях твердости и воспроизводимости результатов является вклад промежуточного слоя в образце 2, который распределяет нагрузку индентора, приложенную к хромовому слою, при слабом адгезионном взаимодействии между слоями. В результате значения микротвердости покрытия образца 2 на 100 единиц твердости ниже, чем в образце 1. Покрытие сложно отнести к равномерным, так как определен значительный разброс значений – от 26 до 34 мкм. Дефекты адгезии и неравномерность не позволяют отнести данное покрытие к качественным.

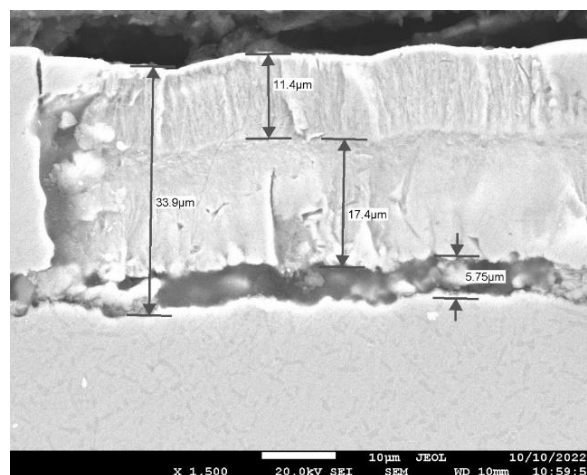
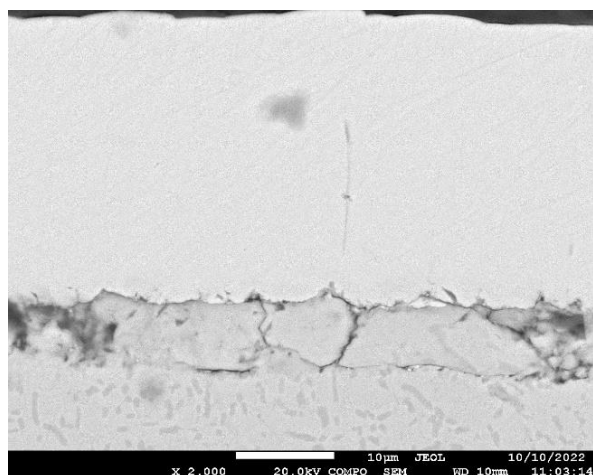


Рис. 2. Образец 2. Поверхность материала основы
Fig. 2. Sample 2. Base material surface

Для образца 3 (рис. 3) характерна превосходная адгезия, определяемая визуально методами РЭМ, как полное прилегание материалов покрытия и основы. Покрытие имеет микротрещины от наружной поверхности в глубину, шириной менее 1 мкм, не приводящие к разрушению и отслоению покрытия. В целом покрытие стоит оценить как сплошное и равномерное.

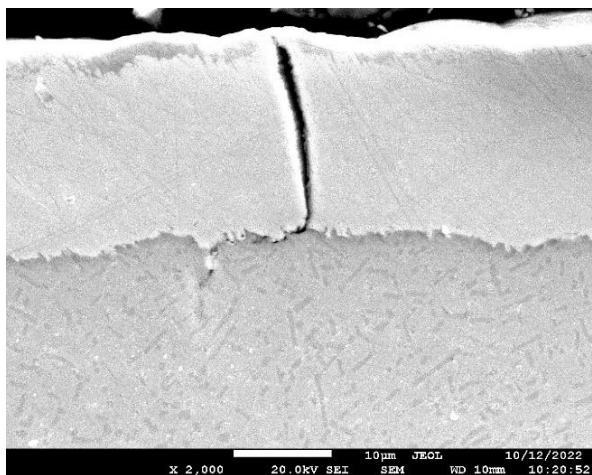


Рис. 3. Образец 3. Микротрещина
Fig. 3. Sample 3. Microcrack

В образце 4 (рис. 4) исследованы участки с превосходной адгезией покрытия, однако определены и другие участки, на которых можно наблюдать неплотное прилегание хрома к титану, что может приводить к отслоению покрытия. В остальном покрытие стоит оценить как сплошное и равномерное. Микротвердость образца 4, подобно микротвердости в образце 2, имеет заметный разброс значений, что, вероятно, также связано с наличием участков покрытия со слабым адгезионным взаимодействием с титановым материалом основы, то есть множественным отслоением покрытия.

На образцах 2 и 4 определен слой окисленного материала основы, который визуализируется как материал, отделяющий титановый сплав и осаждаемый хром, что приводит к неплотному прилеганию хромового покрытия к титановой детали. Вероятной причиной присутствия подобного промежуточного нежелательного слоя является применение режима «реверса» – обратного тока, что, по всей видимости, является излишней процедурой при условии предварительного травления деталей в соляной кислоте. Образцы 1 и 3, полученные в различных режимах электрохимического осаждения хрома без режима «реверса», отличаются плотным прилеганием хромового покрытия.

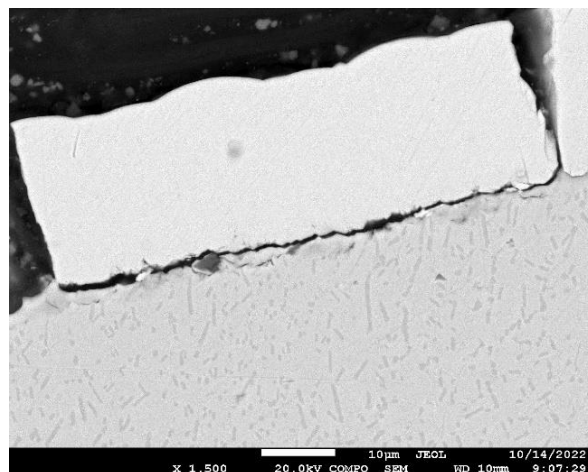


Рис. 4. Образец 4. Отслоение покрытия
Fig. 4. Sample 4. Peeling of the coating

При ступенчатом постепенном увеличении тока, реализованном в режимах 1 и 3, получена различная твердость: 940 и 720 НВ соответственно. Толщина покрытий в связи с большим током и временем электрохимического процесса больше в образце 1. Однако хромовое покрытие, полученное и в режиме 1, и в режиме 3, следует признать качественным. Выбор режимов следует проводить в соответствии с требованиями к конкретному изделию: большая твердость необходима при большей нагруженности детали трением, а при ударных воздействиях необходимо применять более пластичное покрытие с меньшей твердостью. Декоративные покрытия не требуют большой толщины слоя, в отличие от деталей машин и оборудования. Важным фактором подбора режима является экономическая составляющая, так как расход электроэнергии и временные затраты являются ресурсами, определяющими как характеристики и качество покрытия, так и его стоимость.

Закключение

1. Подтверждена возможность применения методики и установки для хромирования стальных деталей энергоэффективным и экосберегающим способом для гальванического нанесения твердого хромового покрытия на титановые валы.
2. Для улучшения адгезионного взаимодействия хрома по отношению к титану рекомендуется проводить предварительную подготовку поверхности материала детали с травлением в соляной кислоте.
3. Режим подачи «обратного тока» приводит к появлению окисленного титанового слоя на поверхности детали, что является негативным фактором для качества хромового покрытия.

4. Микроструктура хромового покрытия определяется режимом электрохимического осаждения. Ступенчатое изменение плотности тока способствует формированию слоистой структуры покрытия.

5. Электрохимический режим осаждения твердого хромового покрытия с постепенным дискретным увеличением силы тока позволяет получить покрытие необходимой толщины с превосходными адгезионным прилеганием, равномерностью и требуемой твердостью.

6. Твердое хромовое покрытие, получаемое описываемым методом на запатентованной ранее установке гальванического нанесения при режимах без использования «обратного» тока, отличается плотным прилеганием к титановому сплаву ВТ22 основы детали и соответствует качественному покрытию с твердостью 720 и 940 НВ.

7. Дальнейшая задача исследований заключается в установлении влияния режимов электрохимического осаждения на слоистую структуру хромового покрытия.

Список источников

1. Современные магниевые и титановые сплавы, применяемые в авиационной промышленности / Морозова Е.А., Прокаев А.Е., Калужная С.А., Мамышев А.Р. // Актуальные исследования. 2022. №16 (95). С. 10-14.
2. Технология нанесения хромового покрытия на детали из титановых сплавов / Юркевич С.Н., Полякова Т.Л., Ващенко И.М., Андриенко К.Г., Аблажей Н.М. // Гальванотехника и обработка поверхности. 2017. Т. 25, № 3. С.48-53. doi: 10.47188/0869-5326_2017_25_3_48
3. Gruba O.N., Shmidt I.V., Gorodkova A.E. Influence of the Parameters of Galvanomechanical Chromium Plating on the Coating Quality and Process Productivity // Solid State Phenomena, 2018, vol. 284, pp. 1173-1177.
4. Zhrebtcov D.A., Gruba O.N., Smolyakova K.R. Effect of Abrasive Tools in Galvanomechanical Treatment on the Roughness of the Deposited Chromium Layer // Solid State Phenomena, 2018, vol. 284, pp. 1178-1183.
5. Galimov D.M., Ardashev D.V., Dyakonov A.A. Methods for determining the quality of galvanic chromium coating // Solid State Phenomena, 2018, vol. 284, pp. 1307-1312.
6. Ardashev D.V., Shipulin L.V., Degtyareva-Kashutina A.S. Aspects of Applying Hard Chromium Coatings on the Inner Surfaces of Components for Hydraulic Drives with Hydrostatic Guideways // Solid State Phenomena. 2021, vol. 316, pp. 827-832, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.827
7. Podgornik B., Massler O., Kafexhiu F., Sedlacek M. Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings. Tribology International. 2018;121:333-340. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.055
8. Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
9. Mekicha M.A., de Rooij M.B., Matthews D.T.A., Pelletier C., Jacobs L., Schipper D.J. The effect of hard chrome plating on iron fines formation // Tribology International, 2020, vol. 142, p. 106003, doi: 10.1016/j.triboint.2019.106003.
10. ГОСТ 9.302-88. Покрытия металлические и неметаллические. Методы контроля. М.: Госстандарт, 1990. 50 с.
11. Патент на полезную модель № 186265 U1 Российская Федерация, МПК C25D 7/04. Установка для нанесения гальванических покрытий: № 2018132309: заявл. 10.09.2018: опубл. 15.01.2019 / Д.В. Ардашев, А.А. Дьяконов, Д.А. Жеребцов [и др.]; заявитель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

References

1. Morozova E.A., Prokaev A.E., Kalyuzhnaya S.A., Mamyshv A.R. Modern magnesium and titanium alloys used in aircraft construction. Aktualnye issledovaniya [Current Research]. 2022;(16(95)):10-14. (In Russ.)
2. Yurkevich S.N., Polyakova T.L., Vashchenko I.M., Andrienok K.G., Ablazhei N.M. Process of chromium plating on parts made of titanium alloys. Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti [Electroplating and Surface Treatment]. 2017;25(3):48-53. DOI: 10.47188/0869-5326_2017_25_3_48
3. Gruba O.N., Shmidt I.V., Gorodkova A.E. Influence of the parameters of galvanomechanical chromium plating on the coating quality and process productivity. Solid State Phenomena. 2018;284:1173-1177.
4. Zhrebtcov D.A., Gruba O.N., Smolyakova K.R. Effect of abrasive tools in galvanomechanical treatment on the roughness of the deposited chromium layer. Solid State Phenomena. 2018;284:1178-1183.
5. Galimov D.M., Ardashev D.V., Dyakonov A.A. Methods for determining the quality of galvanic chromium coating. Solid State Phenomena. 2018;284:1307-1312.
6. Ardashev D.V., Shipulin L.V., Degtyareva-Kashutina A.S. Aspects of applying hard chromium coatings on the inner surfaces of components for hydraulic drives with hydrostatic guideways. Solid State Phenomena. 2021;316:827-832. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.827
7. Podgornik B., Massler O., Kafexhiu F., Sedlacek M. Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings. Tribology International. 2018;121:333-340. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.055
8. Shluger M.A. Galvanicheskie pokrytiya v mashinostroyenii [Galvanic coatings in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985, 240 p. (In Russ.)
9. Mekicha M.A., de Rooij M.B., Matthews D.T.A., Pelletier C., Jacobs L., Schipper D.J. The effect of hard chrome plating on iron fines formation. Tribology Inter-

- national. 2020;142:106003. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106003
10. State Standard GOST 9.302-88. Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie. Metody kontrolya [Metal and non-metal coatings. Control methods]. Moscow: Gosstandart, 1990, 50 p. (In Russ.)
11. Ardashev D.V., Dyakonov A.A., Zherebtsov D.A. et al. Ustanovka dlya naneseniya galvanicheskikh pokrytiy [Electroplating machine]. Utility model patent RU, no. 186265 U1, 2019.

Поступила 20.04.2023; принята к публикации 03.05.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 20/04/2023; revised 03/05/2023; published 27/06/23

Галимов Дамир Муратович – научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Email: galimovdm@susu.ru. ORCID 0000-0002-6060-5525

Ардасhev Дмитрий Валерьевич – доктор технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Email: ardashevdy@susu.ru. ORCID 0000-0002-8134-2525

Дегтярева-Кашутина Анастасия Сергеевна – старший преподаватель, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Email: degtiareva-kashutinaas@susu.ru. ORCID 0000-0003-1781-0395

Damir M. Galimov – Researcher,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: galimovdm@susu.ru. ORCID 0000-0002-6060-5525

Dmitry V. Ardashev – DrSc (Eng), Associate Professor,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: ardashevdy@susu.ru. ORCID 0000-0002-8134-2525

Anastasia S. Degtyareva-Kashutina – Senior Lecturer,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: degtiareva-kashutinaas@susu.ru. ORCID 0000-0003-1781-0395