

Научная статья
УДК 620.197
DOI: 10.34759/vst-2023-1-208-216

МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Артём Александрович Ковалев¹, Михаил Дмитриевич Скаков²✉

^{1,2} Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

¹ kovalevarta@gmail.com

² skakov19@mail.ru ✉

Аннотация. Рассматривается проблема внешнего многофакторного воздействия на корпусные детали машин, в частности влияние коррозии на эксплуатационно-технические характеристики плунжерных насосов, и этапы ее решения. В качестве первого этапа был проведен анализ эксплуатационных характеристик плунжерных насосов, которые широко используются в авиационной технике, и выявлены доминирующие факторы, влияющие на износ корпусных деталей. Кроме того, были рассмотрены способы защиты корпусных деталей, обеспечивающие стойкость основного материала деталей к внешним климатическим факторам, и сформированы критерии сравнения рассматриваемых способов нанесения защитных покрытий. Предложена методика выбора рациональных способов нанесения защитных коррозионно-стойких покрытий на детали типа «Корпус».

Ключевые слова: внешние климатические факторы, корпусные детали, способы защиты металла от коррозии, коррозионная стойкость защитных покрытий, полимерные порошковые покрытия, насос авиационный плунжерный

Для цитирования: Ковалев А.А., Скаков М.Д. Методы защиты корпусных деталей машин от воздействия внешних климатических факторов // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 1. С. 208–216. DOI: 10.34759/vst-2023-1-208-216

Original article

METHODS FOR BASIC PARTS OF MACHINES PROTECTION FROM THE EXTERNAL CLIMATIC FACTORS IMPACT

Artem A. Kovalev¹ ✉, Mikhail D. Skakov²

^{1,2} Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia

¹ kovalevarta@gmail.com ✉

² skakov19@mail.ru

Abstract. The article regards the problem of external multi-factor impact on the basic parts of machines, particularly the impact of corrosion on the operational and technical characteristics of plunger pumps, and the stages of its solution.

In the aviation area, hydraulic systems, to which exclusive requirements on the structural reliability are being imposed, are susceptible to the greatest corrosion impact. Thus, rational method selection for the basic parts protection of aviation products is the up-to-date task, and requires corresponding technique development. This technique is considered on the example of the protection method selection of the part of the aviation hydraulic plunger pump.

The authors performed the analysis of technical requirements to plunger pumps and revealed dominating factors affecting the basic parts wear, as well as considered the ways of deposition of protecting metal and non-metal coatings. The article presents the developed technique for protective corrosion resistant coatings deposition on the parts of the “Case” type. The said technique implementation was performed on the example of structural and technological criteria assessment on each of proposed coating deposition method for the basic part. By the results of this technique, the method of polymer powder coatings deposition is preferable.

The proposed method is being widely employed in production, in particular, while the aircraft and machine-building products manufacturing. This proves the proposed technique fidelity. For the reason that the group of structural and technological criteria is being considered, the said method can be employed not only for the basic parts of the aviation plunger pumps, but for the variety of other products of aviation industry, including gas turbine engine blades, rotary engine stators and other products of aircraft engineering.

Keywords: external climatic factors, basic parts, metal corrosion protection methods, corrosion resistance of protective coatings, polymer powder coatings, aviation plunger pump

For citation: Kovalev A.A., Skakov M.D. Methods for Basic Parts of Machines Protection from the External Climatic Factors Impact. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 208–216. DOI: 10.34759/vst-2023-1-208-216

Введение

Большинство изделий машиностроения эксплуатируются в различных климатических средах. На изделие оказывают влияние температура, влажность воздуха, атмосферное давление и другие внешние климатические факторы. Повышенная влажность в сочетании с отрицательными температурами неблагоприятно сказывается на надежности работы машин, а изменение температуры в большом диапазоне приводит к коррозионному

разрушению деталей и, как следствие, к материально-техническим затратам [1].

К настоящему времени накоплен большой опыт и множество способов защиты поверхностей от коррозии. Эффективная защита металла достигается модификацией свойств его поверхности с использованием следующих методов: изменения самого материала и его оксидной пленки, применения защитных металлических и неметаллических покрытий [2, 3].

Выбор метода нанесения покрытий основан на учете множества особенностей технологического процесса производства изделий с нанесенными покрытиями. Наиболее важные из них: конструктивные особенности деталей; требования к свойствам покрытия, его толщине и к материалу; взаимовлияние физико-химических свойств материала детали и защитного покрытия, объемы производства (единичные и серийные); экологическая приемлемость; условия труда и техники безопасности; требования к подготовке поверхности; необходимость последующей обработки покрытий; энергоемкость процесса нанесения; коэффициент использования материала покрытия. Необходимость учета всех вышеперечисленных особенностей создает проблему выбора рационального способа защиты деталей машиностроения, эксплуатирующихся в различных условиях и подверженных коррозионному воздействию [4].

В авиации наибольшему коррозионному воздействию подвержены гидравлические системы, к которым предъявляются повышенные требования по надежности конструкций [5]. Поэтому выбор способа защиты корпусных деталей авиационных изделий является актуальной задачей и требует разработки соответствующей методики. Данная методика будет рассмотрена на примере гидравлического плунжерного авиационного насоса.

Анализ технических требований плунжерных насосов и выявление доминирующих факторов, влияющих на износ корпусных деталей

Плунжерный насос представляет собой оборудование с возвратно-поступательными движениями, за счет которых вытесняется жидкость или газообразная смесь из камеры.

Работа плунжерных насосов в различных условиях эксплуатации, особенно в гидросистемах авиационной техники, вызывает повышенный износ их деталей и механизмов, в частности корпусных деталей, а с увеличением износа деталей насоса растет расход эксплуатационных материалов, возникают частые отказы и поломки [6].

Основанием данного изделия, на котором размещены все узлы и детали насоса, является деталь «Корпус». Корпус входит в состав горизонтального, двухцилиндрового поршневого насоса двустороннего действия, предназначенного для нагнетания рабочей жидкости [7]; он состоит из секций цилиндрической формы, имеет торцевой разъем, обладает конструктивной прочностью

и является металлоёмкой деталью. Исходя из данных критериев для изготовления корпусных деталей используются стандартные материалы по типу Сталь 45, Сталь 40Х и другие. Корпус в сборе изображен на рис. 1.

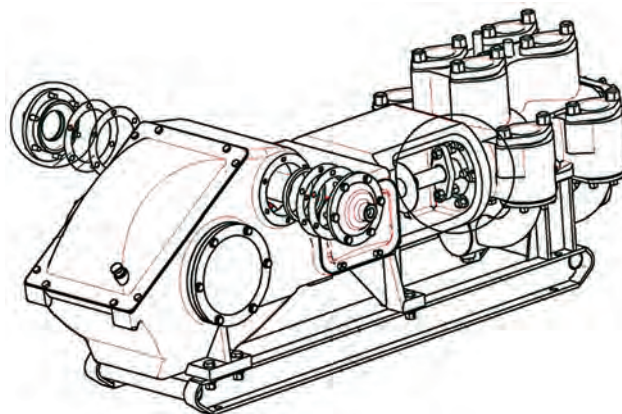


Рис. 1. Эскиз корпуса в сборе

По ГОСТ 26883-86 на деталь «Корпус» могут влиять следующие внешние воздействующие факторы (ВВФ) [8]: климатические (атмосферное давление, температура среды, влажность воздуха); механические (вибрация, поток жидкости, механическое давление); специальные среды (неорганические и органические соединения, масла, смазки, растворители), термические (нагрев) и др.

Исходя из того, что насос эксплуатируется непрерывно в агрессивной среде и необходимо обеспечить условия безотказности его работы, для повышения стойкости корпусной детали к ВВФ используются специальные защитные коррозионно-стойкие покрытия.

Способы нанесения коррозионно-стойких покрытий и критерии их сравнения

К защитным металлическим покрытиям относят покрытия на основании цинка (цинкование), алюминия (алитирование), никеля (никелирование) и хрома (хромирование).

Как правило, горячее цинкование используется для нанесения покрытия на крупные изделия простой формы [9].

Алитирование является процессом насыщения поверхностного слоя изделия алюминием. Данный способ востребован по той причине, что покрытие наносится в течение 15 минут, при этом температура относительно невысокая: от 600 до 800 °С [10].

В основе никелирования лежит реакция восстановления иона никеля до металла с помощью восстановителя. Покрытие никелем обладает высокой

твердостью, хорошо полируется и обеспечивает более долгий срок службы изделия [11].

Хромирование представляет собой диффузионное насыщение поверхности изделий хромом или процесс осаждения на поверхность детали слоя хрома из электролита под действием электрического тока. Благодаря этому методу достигнуты высокие технологические характеристики процесса получения поверхности с высокой износостойкостью, что позволяет уменьшить толщину покрытия без сокращения срока службы изделия, а также снизить энергозатраты и удельный расход сырья [12, 13].

К неметаллическим способам нанесения покрытий относят: оксидирование, воронение, пассивирование и фосфатирование.

Оксидирование предполагает обработку металлов растворами, смесями, расплавами химических элементов. Одним из распространенных и доступных методов защиты от коррозии нержавеющей стали является метод электрохимического оксидирования, позволяющий сформировать оксидные покрытия на металлах или сплавах. Преимущество этого метода в том, что анодирование сталей не вызывает водородного охрупчивания и при этом размеры деталей существенно не изменяются [14–16].

Воронение применяется для стальных, медных и чугунных изделий. Структура такого покрытия является микрокристаллической и микропористой, толщина от 1 до 10 мкм [17].

Позволяет вернуть нержавеющей стали ее первоначальные свойства и дополнительно защитить от воздействия многих внешних факторов пассивация — специальная химическая обработка металлических изделий, после проведения которой на их поверхности образуется специальное защитное покрытие. При взаимодействии с концентрированными кислотами на нержавеющей стали появляется малозаметная пленка. Толщина пленки от 5 до 20 нм [18].

Процессы пассивации широко используются для повышения коррозионной стойкости стали, цинка, кадмия, алюминия, магния, серебра, никеля, меди и др. Наиболее распространенными являются процессы хроматной пассивации черных и цветных металлов.

Покрытия, нанесенные методом фосфатирования, обладают высокой адгезией и электроизоляцией. Толщина фосфатного слоя от 2–8 до 40–50 мкм. Фосфатные пленки не обладают достаточными защитными свойствами из-за пористости структуры, поэтому после получения их еще дополнительно обрабатывают [19, 20].

При производстве деталей в качестве их защиты также распространены лакокрасочные и полимерные порошковые покрытия.

Лакокрасочные покрытия (ЛКП) предназначены для выполнения защитной и декоративной функций. Их наносят на заранее обработанную поверхность металла; когда слой высыхает, образуется защитное антикоррозийное покрытие. Предельная температура эксплуатации покрытия 150–200 °С (исключение составляют покрытия на основе кремнийорганических ЛКП) [21, 22].

Полимерные покрытия наделяют изделие износостойкостью, прочностью, надежностью и долговечностью. В отличие от ЛКП, процесс полимеризации не требует грунтовки, а также множества слоев покрытия [23–25].

Таким образом, для защиты корпусных деталей существует множество способов нанесения коррозионно-стойкого покрытия, и необходимо разработать формализованную методику выбора рационального способа нанесения покрытия.

Методика выбора рациональных способов нанесения защитных коррозионно-стойких покрытий и ее оценка

Сформируем группы критериев для более объективного сравнения методов защиты металла от коррозии. Группы критериев предлагается выделить следующие: характеристика обрабатываемого объекта (назначение детали, материал детали, площадь обрабатываемой поверхности); качество покрытия (коррозионная стойкость, адгезия, толщина покрытия); условия проведения нанесения (экологичность, возможность автоматизации); материальные затраты (сырьёмкость, энергоёмкость, коэффициент использования материала и стоимость оборудования); временные затраты (время подготовки оборудования/состава, время подготовки поверхности, время нанесения покрытия, время последующей обработки).

Зная величину измерений каждого из перечисленных критериев (что является исходными данными), составляют методику выбора рационального способа нанесения покрытия.

Разработанная методика заключается в следующем:

1. Строится матрица, в каждой строке которой указываются критерии качества покрытия, а в каждом столбце — виды защитного покрытия поверхности, различающиеся методом нанесения, химическим составом, количеством слоев и выбором агрессивной среды (влаги или соляной туман).

2. В каждой строке выбирается минимальное и максимальное значение критерия. Таким образом получается диапазон всех значений по данному критерию.

3. После нахождения крайних значений определяется разность между ними Δ и полученная Δ делится на 100 (не касается тех критериев, где в качестве оценки используются баллы). Таким образом получаются диапазоны значений, каждый из которых имеет свою оценку от 1 до 100 (рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема перевода численного значения критерия в баллы

4. Когда все критерии переведены в балльную систему оценивания, находится сумма всех баллов в столбце. Данная сумма равняется балльной оценке качества защитного слоя (рис. 3).

На основании критериев и предложенной методики стало возможным определить способ нанесения защитного покрытия, характеристики которого являются рациональными среди всех предложенных вариантов.



Рис. 3. Блок-схема оценки способа нанесения защитного покрытия

Нанесение защитного покрытия выполняется на наружные поверхности детали «Корпус» плунжерного насоса. Все значения характеристик по каждому способу нанесения покрытия получены из анализа литературных источников [5, 13] и представлены в табл. 1 и 2.

Множество критериев по каждому способу нанесения покрытия, представленных в табл. 1 и 2, и их значения показывают, что оценить и выбрать однозначно предпочтительный вариант защиты поверхности корпуса по одному критерию невозможно, так как у каждого способа только некоторые критерии являются рациональными. Например, у ЛКП время подготовки поверхности, время подготовки оборудования и его стоимость являются самыми рациональными критериями по отношению к другим способам, при этом коррозионная стойкость и адгезия наименее предпочтительны. Таким образом, целесообразно рассматривать группу критериев. Для этого необходимо определить диапазон оценки критериев согласно п. 2 представленной

Таблица 1

Характеристики методов защиты поверхности

Способ нанесения	Холодное цинкование	Алитирование	Никелирование	Хромирование	Лакокрасочное покрытие (ЛКП)	Полимерное покрытие
Критерии оценивания						
Коррозионная стойкость покрытия, г	60	60	35	35	80	45
Толщина покрытия, мкм	60	200	125	175	200	220
Адгезия, балл	4	3	2	1	4	3
Сырьёмкость, руб./м ²	960	520	960	640	300	840
Энергоёмкость, кВт	0	24	26	24	1,75	5
Коэффициент использования материала	0,35	0,6	0,6	0,6	0,35	0,9
Стоимость оборудования, тыс.руб.	10	1200	1000	800	10	115
Условия проведения работы (экологичность)	Опасно	Опасно	Опасно	Опасно	Опасно	Опасно
Время подготовки оборудования/состава, мин	<1	25	20	20	<1	8
Время подготовки поверхности, мин	20	25	25	25	20	20
Время обработки (нанесения) покрытия на 1 м ² , мин	5	15	5	20	20	20
Время последующей обработки, мин	60	60	50	90	240	5

Таблица 2

Характеристики методов защиты поверхности

Способ нанесения	Горячее цинкование	Оксидирование	Воронение	Пассивирование	Фосфатирование
Критерии оценивания					
Коррозионная стойкость покрытия, г	40	50	60	35	50
Толщина покрытия, мкм	60	20	15	30	20
Адгезия, балл	3	2	3	3	4
Энергоёмкость, кВт	15	10	10	10	4
Сырьёмкость, руб./м ²	580	250	200	250	120
Коэффициент использования материала	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Стоимость оборудования, тыс.руб.	5000	900	900	900	800
Условия проведения работы (экологичность)	Опасно	Опасно	Опасно	Опасно	Опасно
Время подготовки оборудования/состав, мин	40	20	20	20	20
Время подготовки поверхности, мин	25	25	25	25	25
Время обработки (нанесения) покрытия на 1 м ² , мин	10	30	50	45	15
Время последующей обработки, мин	40	25	20	20	20

Таблица 3

Диапазон оценки критериев

Критерии оценивания	Max значение	Min значение	H, шаг на 1 балл
Коррозионная стойкость покрытия, г	80	35	0.45
Толщина покрытия, мкм	220	15	2.05
Адгезия, балл	4	1	0.03
Сырьёмкость, руб./м ²	960	120	8.40
Энергоёмкость, кВт	26	0	0.26
Коэффициент использования материала	0.9	0.35	0.01
Стоимость оборудования, тыс.руб.	5000	10	50
Условия проведения работы (экологичность)	Безопасно	Опасно	-
Время подготовки оборудования/состава, мин	40	1	0.39
Время подготовки поверхности, мин	25	20	0.05
Время обработки (нанесения) покрытия на 1 м ² , мин	50	5	0.45
Время последующей обработки, мин	240	5	2.35

Таблица 4

Характеристики методов защиты поверхности в баллах

Способ нанесения	Холодное цинкование	Алюминирование	Никелирование	Хромирование	Лакокрасочное покрытие (ЛКП)	Полимерное покрытие
Критерии оценивания						
Коррозионная стойкость покрытия, г	44	44	100	100	0	77
Толщина покрытия, мкм	22	90	54	78	90	100
Адгезия, балл	0	33	66	100	0	33
Энергоемкость, кВт	100	8	0	8	93	81
Сырьёмкость, руб./м ²	0	52	0	38	79	14
Коэффициент использования материала	0	45	45	45	0	100
Стоимость оборудования, тыс.руб.	100	76	80	85	100	97
Условия проведения работы (экологичность)	0	0	0	0	0	0
Время подготовки оборудования/состава, мин	100	38	51	51	100	82
Время подготовки поверхности, мин	100	0	0	0	100	100
Время обработки (нанесения) покрытия на 1 м ² , мин	100	78	100	67	67	67
Время последующей обработки, мин	64	77	81	64	0	100
Σ	630	541	577	636	629	851

Таблица 5

Характеристики методов защиты поверхности в баллах

Способ нанесения	Горячее цинкование	Оксидирование	Воронение	Пассивирование	Фосфатирование
Критерии оценивания					
Коррозионная стойкость покрытия, г	88	66	44	100	66
Толщина покрытия, мкм	22	3	0	7	3
Адгезия, балл	33	66	33	33	0
Сырьёмкость, руб./м ²	45	85	90	85	100
Энергоемкость, кВт	42	61	61	61	85
Коэффициент использования материала	45	45	45	45	45
Стоимость оборудования, тыс.руб.	0	82	82	82	85
Условия проведения работы (экологичность)	0	0	0	0	0
Время подготовки оборудования/состава, мин	0	51	51	51	51
Время подготовки поверхности, мин	0	0	0	0	0
Время обработки (нанесения) покрытия на 1 м ² , мин	89	45	0	10	78
Время последующей обработки, мин	85	91	94	94	94
Σ	449	595	500	568	607

методики и шаг на 1 балл согласно п. 3. Полученные значения представлены в табл. 3.

После установления диапазона оценки критериев необходимо перевести значения характеристик из табл. 1 и 2 в балльный вид согласно табл. 3 и внести значения в табл. 4 и 5.

По суммарным балльно-рейтинговым значениям критериев оценивания, полученным для каждого способа нанесения защитного покрытия согласно п. 4 предложенной методики, построена столбчатая диаграмма сравнения (рис. 4). Чем выше значение суммарного показателя, тем предпочтительнее способ нанесения покрытия.

На основании методики выбора рационального способа нанесения покрытия сделан вывод о предпочтительности полимерных порошковых покрытий.

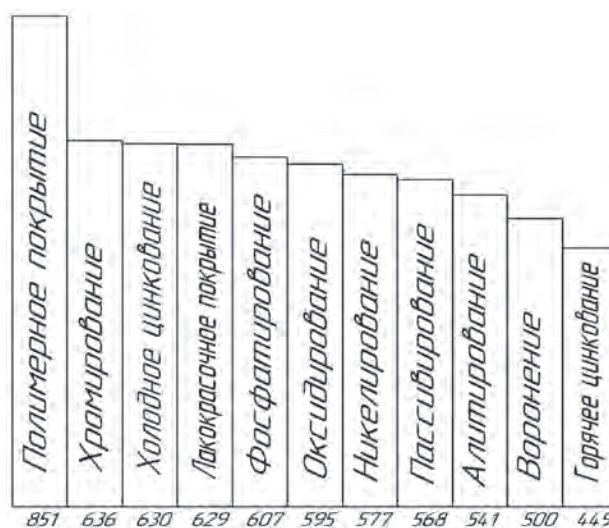


Рис. 4. Столбчатая диаграмма сравнения способов нанесения защитных покрытий

Выводы

По результатам анализа эксплуатационных характеристик поршневых насосов, после определения доминирующих факторов, влияющих на износ корпусных деталей, а также рассмотрения способов защиты корпусных деталей, обеспечивающих стойкость основного материала деталей к внешним климатическим факторам, была предложена методика выбора рациональных способов нанесения защитных коррозионно-стойких покрытий на детали типа «Корпус». Выявлено, что предпочтительным является нанесение полимерных порошковых покрытий. Этот метод широко используется на производстве, в частности при изготовлении изделий машиностроения, множества изделий авиационной техники, таких как лопатки ГТД, статоры роторно-поршневых двигателей и др., что подтверждает достоверность предложенной методики.

Список источников

1. Мухаметшина Р.М., Петров А.В. Влияние технического состояния на экологическую безопасность дорожно-строительных машин // Техника и технология транспорта. 2018. № 1(6). URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N6-13EB118.pdf>
2. Защита металлов от коррозии: современные технологии покрытий // Металлургический бюллетень. 2003. № 07. URL: <https://www.metalbulletin.ru/a/AB>
3. Taveira L.V., Montemor M.F., Da Cunha Belo M., Dick L.F.P. Influence of incorporated Mo and Nb on the Mott–Schottky behaviour of anodic films formed on AISI 304L // Corrosion Science. 2010. Vol. 52. No. 9, pp. 2813–2818. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.04.021
4. Бобров Г.В., Ильин А.А., Спектор В.С. Теория и технология формирования неорганических покрытий: Монография. — М.: Альфа-М, 2014. — 928 с. URL: <https://znanium.com/catalog/product/471414>
5. Говорков А.С. Методика количественной оценки технологичности конструкции изделий авиационной техники // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 1. С. 31–37.
6. Эксплуатация бурового насоса. 2015. URL: https://studopedia.ru/8_154408_ekspluatatsiya-burovih-nasosov.html
7. Насос буровой НБ-32, НБ-50. URL: <http://www.anteynestemash.ru/upload/iblock/dfe/dfe8c67dfbbd15ad792468a22e4bac2f.pdf>
8. ГОСТ 26883-86 Внешние воздействующие факторы. — М.: Стандартинформ, 2008. — 19 с.
9. Никелевые покрытия. URL: <http://www.goldsteg.ru/book/glava-1-galvanostegiya/12-nikelevye-pokrytiya/>
10. Медведев М.С. Современные способы защиты металла от коррозии // Эпоха науки. 2019. № 20. С. 182–185. DOI: 10.24411/2409-3203-2019-12031
11. Слепцов О.В., Фофанов Б.А., Шальнев А.Н., Соловьев К.А. Химическое осаждение никелевых покрытий и их коррозионная устойчивость // Физико-химические проблемы строительного материаловедения. 2008. № 1. С. 47–51.
12. Хромирование. URL: <http://www.goldsteg.ru/book/glava-1-galvanostegiya/14-khromirovanie-blestyashchie-khromovye-pokrytiya/>
13. Способ нанесения гальванических покрытий. URL: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=92262>
14. Кузнецов Ю.И., Макаров Д.А., Вершок Д.Б. Ускоритель оксидирования стали в растворах нитрита аммония // Защита металлов. 2004. Т. 40. № 1. С. 7–10.
15. Ковалев А.А., Тищенко Л.А., Антипин М.А., Шаховцев М.М. Обеспечение однородности оксидной пленки на поверхности монокристаллических кремниевых подложек в процессе их термического оксидирования // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 170–177.
16. Нагурянская Ю.Н. Исследование свойств оксидных пленок металлических катализаторов // Качество в производственных и социально-экономических системах: сборник научных трудов 2-й Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Юго-Западного государственного университета (22–23 апреля 2014; Курск). — Курск: Университетская книга, 2014. Т. 2. С. 252–256.
17. Воронение стали: описание процесса, основные способы. 2021. URL: https://kzmc.kz/articles/vorone-nie_stali_opisanie_protsesta_osnovnye_sposoby/
18. Химическое пассивирование нержавеющей стали. URL: <https://filigrann.ru/uslugi/himicheskoe-passivirovanie-nerzhaveyushhej-stali>
19. Григорян Н.С., Акимова Е.Ф., Ваграмян Т.А. Фосфатирование: Учеб. пособие. — М.: Глобус, 2008. — 138 с.
20. Латамуев В.И., Ганай Г.Н., Денисов А.Д. Металлические покрытия химическим способом. — Барнаул: Алт. кн. изд-во, 1986. — 208 с.
21. Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий: Учеб. пособие. — Л.: Химия, 1981. — 352 с.
22. Гаврилов Д.Г., Корнев Ю.В., Мамонов С.В., Мартирозов М.И., Рабинский Л.Н. Наноинdentирование порошковых лакокрасочных покрытий, наносимых на металлические поверхности // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 1. С. 81–91.
23. Азизов Р.О., Саидов М.Х. Технологические процессы нанесения покрытий из полимерных порошковых материалов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2014. Т. 57. № 6. С. 497–501.
24. Nishimura R., Inoue H., Okitsu K. et al. Hydrogen permeation behavior in pure nickel implanted with phosphorus, sulphur and their mixture // Corrosion Science. 2007. Vol. 49. No. 3, pp. 1478–1495. DOI: 10.1016/j.corsci.2006.08.015
25. Богатеев Д.Г., Богатеев Г.Г., Абдуллин И.А. и др. Исследование характеристик полимерных покрытий для защиты металлических конструкций от коррозии // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 7. С. 357–362.

References

1. Mukhametshina R.M., Petrov A.V. *Tekhnika i tekhnologiya transporta*, 2018, no. 1(6). URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N6-13EB118.pdf>
2. *Metallurgicheskii byulleten'*, 2003, no. 07. URL: <https://www.metalbulletin.ru/a/AB>

3. Taveira L.V., Montemor M.F., Da Cunha Belo M., Dick L.F.P. Influence of incorporated Mo and Nb on the Mott–Schottky behaviour of anodic films formed on AISI 304L. *Corrosion Science*, 2010, vol. 52, no. 9, pp. 2813–2818. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.04.021
4. Bobrov G.V., Il'in A.A., Spektor V.S. *Teoriya i tekhnologiya formirovaniya neorganicheskikh pokrytii* (Theory and technology of inorganic coatings forming), Moscow, Al'fa-M, 2014, 928 p. URL: <https://znanium.com/catalog/product/471414>
5. Govorkov A.S. Method of quantitative assessment of the airframe element manufacturability. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 31–37.
6. *Ekspluatatsiya burovogo nasosa*. 2015. URL: https://studopedia.ru/8_154408_ekspluatatsiya-burovih-nasosov.html
7. *Nasos burovoy NB-32, NB-50*. URL: <http://www.anteynef-temash.ru/upload/iblock/dfe/dfe8c67dfbbd15ad792468a22e4bac2f.pdf>
8. *Vneshnie vozdeistviyushchie faktory. GOST 26883-86* (Exposure factors. Terms and definitions, State Standard 26883-86), Moscow, Standartinform, 2008, 19 p.
9. *Nikelevye pokrytiya*. URL: <http://www.goldsteg.ru/book/glava-1-galvanostegiya/12-nikelevye-pokrytiya/>
10. Medvedev M.S. *Epokha nauki*, 2019, no. 20, pp. 182–185. DOI: 10.24411/2409-3203-2019-12031
11. Sleptsov O.V., Fofanov B.A., Shal'nev A.N., Solov'ev K.A. *Fiziko-khimicheskie problemy stroitel'nogo materialovedeniya*, 2008, no. 1, pp. 47–51.
12. *Khromirovanie*. URL: <http://www.goldsteg.ru/book/glava-1-galvanostegiya/14-khromirovanie-blestyashchie-khromovye-pokrytiya/>
13. *Sposob naneseniya gal'vanicheskikh pokrytii*. URL: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=92262>
14. Kuznetsov Yu.I., Makarov D.A., Vershok D.B. *Zashchita metallov*, 2004, vol. 40, no. 1, pp. 7–10.
15. Kovalev A.A., Tischenko L.A., Antipin M.A., Shakhovtsev M.M. Oxide film homogeneity provision on the surface of silicon monocrystal substrates while their thermal oxidation process. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 170–177.
16. Naguryanskaya Yu.N. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Kachestvo v proizvodstvennykh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh" (22–23 April 2014; Kursk)*. Kursk, Universitetskaya kniga, 2014, vol. 2, pp. 252–256.
17. *Voronenie stali: opisaniye protsessa, osnovnyye sposoby*. 2021. URL: https://kzmc.kz/articles/voronenie_stali_opisanie_protssesa_osnovnye_sposoby/
18. *Khimicheskoe passivirovanie nerzhavayushchei stali*. URL: <https://filigrann.ru/uslugi/himicheskoe-passivirovanie-nerzhavayushhej-stali>
19. Grigoryan N.S., Akimova E.F., Vagramyan T.A. *Fosfatirovanie* (Phosphating), Moscow, Globus, 2008, 138 p.
20. Latatuev V.I., Ganai G.N., Denisov A.D. *Metallicheskie pokrytiya khimicheskim sposobom* (Metallic coatings chemically), Barnaul, Altaiskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1986, 208 p.
21. Yakovlev A.D. *Khimiya i tekhnologiya lakokrasochnykh pokrytii* (Chemistry and technology of paint-and-lacquer coatings), Leningrad, Khimiya, 1981, 352 p.
22. Gavrilov D.G., Kornev Y.V., Mamonov S.V., Martirosov M.I. Nanoindentation of powdered lacquer coatings on metal samples. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 81–91.
23. Azizov R.O., Saidov M.Kh. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan*, 2014, vol. 57, no. 6, pp. 497–501.
24. Nishimura R., Inoue H., Okitsu K. et al. Hydrogen permeation behavior in pure nickel implanted with phosphorus, sulphur and their mixture. *Corrosion Science*, 2007, vol. 49, no. 3, pp. 1478–1495. DOI: 10.1016/j.corsci.2006.08.015
25. Bogateev D.G., Bogateev G.G., Abdullin I.A. et al. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2010, no. 7, pp. 357–362.

Статья поступила в редакцию 20.01.2023; одобрена после рецензирования 30.01.2023; принята к публикации 31.01.2023.

The article was submitted on 20.01.2023; approved after reviewing on 30.01.2023; accepted for publication on 31.01.2023.