

УДК 621.357.7

А.А. Никифоров¹, К.Н. Смирнов², Д.В. Кравченко²,
Е.А. Архипов³, Л.И. Закирова¹, С.С. Виноградов¹

**ПРИМЕНИМОСТЬ СУЛЬФАТНО-АММОНИЙНОГО
ЭЛЕКТРОЛИТА КАДМИРОВАНИЯ С ДОБАВКОЙ ЦКН-04
ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-12-12

В сульфатно-аммонийном электролите кадмирования с добавкой ЦКН-04 определены диапазоны концентраций компонентов электролита, позволяющие получать светлые компактные кадмиевые покрытия на сложнопрофилированных деталях. Электролит обладает высокими рассеивающей (50–94%) и кроющей (92–95%) способностями, сравнимыми и порой превышающими такие же параметры у цианистых электролитов. С проведением регламентных корректировок электролит показывает высокую эксплуатационную стабильность и может быть применен в серийном производстве. Проведенные механические испытания показали, что технология нанесения кадмиевого покрытия из сульфатно-аммонийного электролита с добавкой ЦКН-04 не влияет на механические свойства сталей средней прочности типа 30ХГСА.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17.2. «Шликерные, газодинамические и комбинированные покрытия для деталей из углеродистых сталей, в том числе высокопрочных» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: кадмирование, сульфатно-аммонийный электролит, добавка ЦКН-04, выход кадмия по току, рассеивающая способность, кроющая способность, механические свойства стали 30ХГСА.

In sulfate-ammonium cadmium plating solution with additive TsKN-04 the concentration ranges of the components of the electrolyte are identified to allow obtaining light compact cadmium coatings on complex geometry parts. The electrolyte has a high scattering (50–94%) and covering (92–95%) power that are comparable and sometimes exceeding the same parameters from cyanide electrolytes. With carrying out preventive corrections the electrolyte shows high operational stability and it can be applied in mass production. Mechanical tests show that the technology of deposition of cadmium coating in the sulfate-ammonium bath with the additive TsKN-04 does not influence on mechanical properties of medium strength steels 30kHGSA.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 17.2. «Slip, gas-dynamic and combined coatings for details from carbon steels, including high-strength steels» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: cadmium plating, sulfate-ammonium electrolyte, additive TsKN-04, current efficiency, scattering power, covering power, mechanical properties of steel 30kHGSA.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» [Federal state educational institution of higher education D.I. Mendeleev University of Chemical Technology]; e-mail: rector@muctr.ru

³Общество с ограниченной ответственностью производственная компания «НПП СЭМ.М» [Limited liability company Production company «Scientific and production enterprise SEM.M»]; e-mail: npp-semm@yandex.ru

Введение

Дальнейшее развитие машиностроения и, в частности, авиастроения в России невозможно без создания новых материалов с кардинально улучшенными служебными характеристиками и технологий их переработки [1, 2]. В течение последних лет во ФГУП «ВИАМ» проведены комплексные исследования высокопрочных мартенситостареющих сталей с прочностью >1570 МПа, позволившие рекомендовать их для изготовления различных деталей авиационной техники [3, 4]. Сравнительные коррозионные испытания образцов из высокопрочных сталей без покрытий показали, что эти стали не могут быть применены без защиты от атмосферной коррозии [5–7].

Основным видом покрытий, применяемым для защиты от коррозии стальных деталей в изделиях авиационной техники, эксплуатируемых во всеклиматических условиях, является кадмиевое покрытие. Вследствие высокой токсичности соединений кадмия необходима его замена [8]. Многие годы в стране и, в частности, во ФГУП «ВИАМ» велись работы по замене кадмиевого покрытия [9–14]. Разработанные покрытия приближаются по защитной способности к кадмиевым покрытиям. Отсутствие сравнительных данных по другим свойствам покрытий и некоторое усложнение технологии их нанесения препятствуют широкому внедрению альтернативных кадмиевому покрытий. Поэтому в настоящее время кадмиевое покрытие в авиа- и судостроительной, военной технике, ответственной автоматике и некоторых других отраслях промышленности используется в качестве основного антикоррозионного покрытия. Это обусловлено сочетанием таких уникальных свойств кадмиевых покрытий, как высокая пластичность, способность к пайке после длительного хранения, хорошая защитная способность в сочетании с высокой (по сравнению с цинковыми покрытиями) коррозионной устойчивостью, особенно во влажном морском климате, а также снижение разности электродных потенциалов между медными деталями и сопрягаемыми с ними деталями из алюминия и коррозионностойкой стали [15].

Осаждение кадмия обычно сопровождается разрядом ионов водорода с последующим наводороживанием стальной основы. Внедрение водорода в кристаллическую решетку стали снижает механическую прочность и упругие характеристики покрытых деталей [16]. В связи с чем обязательно проведение обезводороживающей термической обработки изделий сразу после нанесения кадмиевого покрытия при температуре $200\text{--}230^\circ\text{C}$ в течение нескольких часов в зависимости от типа обрабатываемой стали [15, 17].

В научно-технических литературных источниках, как правило, указывают выход по току кадмия $\sim 100\%$ (имея ввиду, что из-за высокого перенапряжения водорода на катоде происходит преимущественный разряд ионов кадмия), однако по данным исследователей работы [18] наводороживание стали происходит главным образом через поры покрытия: ионы водорода проникают через поры и разряжаются на поверхности железа, перенапряжение выделения водорода на котором мало по сравнению с перенапряжением на кадмии, что создает условия для снижения механических характеристик материала основы.

Промышленное применение нашли сульфатные, хлористо-аммонийные, сульфатно-аммонийные, цианистые, пирофосфатные, а также электролиты на основе органических и смешанных лигандов (трилон Б, ПЭПА) [19]. В авиастроении используются цианистые, хлористо-аммонийные и сульфатно-аммонийные электролиты.

Цианистый электролит кадмирования имеет более высокую рассеивающую способность по сравнению с другими электролитами. В этом электролите рекомендуется кадмировать детали сложной конфигурации, а также стальные детали, изготовленные методом литья. Недостатком цианистого электролита является его токсичность и значительное наводороживание стали при кадмировании.

Хлористо-аммонийный электролит кадмирования прост по составу и устойчив в работе, рассеивающая способность этого электролита ниже цианистого. Хлористо-аммонийный электролит кадмирования является малонаводороживающим. При применении этого электролита стандартные механические свойства стали практически не изменяются.

Одним из наиболее перспективных для применения в промышленности бесцианистых электролитов кадмирования является сульфатно-аммонийно-уротропиновый электролит с диспергатором НФ. Он обладает более высокой рассеивающей способностью по сравнению с хлористо-аммонийным электролитом и позволяет осаждать гладкие светлые мелкокристаллические покрытия даже на сложнопрофилированных изделиях. При кадмировании в этом электролите сталь наводороживается в меньшей степени, чем в цианистом, но он имеет ряд недостатков: сложность состава, зависимость качества покрытия от качества диспергатора НФ, плохая растворимость применяемых в этом электролите смачивателей ОП-7 или ОС-20, темные покрытия в области низких плотностей тока.

Вместе с тем все приведенные в технической литературе бесцианистые электролиты кадмирования сильно уступают цианистым в первую очередь по кроющей способности.

Данная работа направлена на исследование свойств сульфатно-аммонийного электролита кадмирования с добавкой ЦКН-04, имеющего при определенных условиях эксплуатационные характеристики, не уступающие характеристикам цианистых электролитов, с целью определения применимости его в самолетостроении.

Материалы и методы

Для выполнения работы использовали образцы из стали 30ХГСА с пределом прочности $\sigma_{\text{в}}=1450\pm 50$ МПа.

Все электролиты и вспомогательные растворы готовили с применением дистиллированной воды по ГОСТ 6709 путем последовательного растворения расчетного количества соответствующих химических реактивов квалификации не ниже «ч.».

Покрытия наносили в гальваностатическом режиме с помощью стабилизированного источника питания Б5-47. Катодный выход по току кадмия определяли по разнице масс образца после и до нанесения покрытия толщиной не менее 10 мкм.

Рассеивающую способность (РС) электролитов определяли согласно ГОСТ 9.309 в щелевой ячейке Молера.

При изучении кроющей способности (КС) электролитов применяли две методики [20]. По первой методике (*метод 1*) электроосаждение кадмия проводили в угловой ячейке Хулла на медные катодные пластины в течение не более 10 мин при токовой нагрузке 1,0 А. В процессе электроосаждения визуально фиксировали время образования сплошного слоя кадмия в области низких катодных плотностей тока. Кроме того, оценивали внешний вид покрытия. По второй методике (*метод 2*) осаждение кадмия проводили на стальную пластину шириной 20 и длиной 150 мм, согнутую пополам таким образом, чтобы внутренний зазор составлял $1\pm 0,5$ мм. Режим осаждения: 1 А/дм² в течение 30 мин. Для осмотра пластину разгибали; критерием оценки КС являлось процентное отношение площади внутренней поверхности образца, покрытой кадмием, к общей внутренней поверхности.

Диапазон осаждения качественных покрытий определяли при помощи угловой ячейки Хулла с применением медных тест-пластин. Тестирование проводили в течение 10 мин при токовой нагрузке 1 А. После осаждения покрытия пластину промывали, высушивали и подвергали визуальному осмотру.

Определение толщины покрытия осуществляли неразрушающим методом с помощью толщиномера Elcometr 456 по ГОСТ 9.302.

Испытания для определения механических свойств образцов проводили на испытательной машине Zwick/Roell Z100 по ГОСТ 1497.

Исследования наводороживания стальной основы путем определения склонности образцов с покрытиями к замедленному хрупкому разрушению (ЗХР) на образцах с надрезами выполнены при статическом нагружении на машинах ZST 3/3 (3000 кг) при напряжении, равном 80–70% от предела прочности при разрыве образцов с надрезами (σ_B^H).

Результаты и обсуждение

В присутствии добавки ЦКН-04 в количестве 10 мл/л и при содержании серно-кислого аммония 200 г/л при варьировании концентрации серно-кислого кадмия показано, что при ее уменьшении <35 г/л существенно снижается допустимая катодная плотность тока осаждения качественных покрытий, т. е. при >0,8–1,0 А/дм² начинается активное выделение водорода, покрытие осаждается темное и мажущееся. Кроющая способность электролита при этом остается высокой. Повышение концентрации серно-кислого кадмия >60 г/л приводит к снижению КС – в области низких плотностей тока (<0,2 А/дм²) наблюдается непокрытие. Таким образом, допустимым диапазоном концентрации серно-кислого кадмия в электролите можно считать 35–60 г/л.

Изменение концентрации серно-кислого аммония (в присутствии добавки ЦКН-04 в количестве 10 мл/л и при содержании серно-кислого кадмия 50 г/л) показало, что ее уменьшение <180 г/л снижает КС электролита. При плотностях тока <0,3 А/дм² покрытие отсутствует. Увеличение содержания серно-кислого аммония >260 г/л приводит к частичной коагуляции добавки ЦКН-04 и началу кристаллизации основных компонентов. Таким образом, допустимым диапазоном концентрации серно-кислого аммония в электролите можно считать 180–260 г/л.

Кроме того, результаты исследования показали, что высокое содержание кадмия при низком содержании серно-кислого аммония приводит к существенному снижению кроющей и рассеивающей способности электролита даже в присутствии добавки ЦКН-04. Хорошие показатели КС и РС достигаются при весовых соотношениях серно-кислого аммония к серно-кислому кадмию (в пересчете на кристаллогидрат) не ниже чем 4:1.

Содержание добавки ЦКН-04 оказывает влияние на КС электролита и качество получаемых покрытий. При ее концентрации <7 мл/л покрытие отсутствует при плотностях тока <0,2 А/дм², при этом оно становится темным, с коричневатым оттенком; на высоких плотностях тока (>1,5 А/дм²) наблюдается подгар покрытия. При введении добавки ЦКН-04 в количестве >15 мл/л она частично коагулирует и выпадает в виде коричневатого осадка. Таким образом, допустимым диапазоном концентрации добавки ЦКН-04 в электролите можно считать 7–15 мл/л.

В качестве смачивающей добавки, способствующей улучшению внешнего вида кадмиевого покрытия (особенно на труднодоступных участках), в сульфатно-аммонийных электролитах рекомендуются неионогенные ПАВ (поверхностно-активные вещества) – например ОП-7, ОП-10 и ОС-20. Однако указанные ПАВ плохо растворяются не только в известных, но и в исследуемом электролитах и уже при невысоких концентрациях коагулируют и налипают на детали. Для замены известных ПАВ использовали добавку ЦКН-04С, которая неограниченно смешивается с исследуемым электролитом, не вызывая коагуляции каких-либо компонентов, однако при концентрации ее >10 мл/л подавляется действие добавки ЦКН-04, в результате чего покрытия становятся матовыми. При содержании <5 мл/л добавки ЦКН-04С она не оказывает достаточно заметного действия. В диапазоне концентраций от 5 до 10 мл/л добавка

ЦКН-04С улучшает качество покрытия с кадмием в области низких катодных плотностей тока и несколько повышает предельно допустимую катодную плотность тока (на ~15–20%), при этом значения катодных выходов по току практически не изменяются, а КС и РС по металлу остаются на высоком уровне. Замечено также, что присутствие добавки ЦКН-04С благоприятно сказывается на качестве кадмиевых покрытий, наносимых из сульфатно-аммонийных электролитов (в том числе и исследуемого) после длительной эксплуатации, загрязненных продуктами химических и электрохимических превращений добавок и примесями ионов посторонних металлов (железа, цинка, меди). Таким образом, допустимым диапазоном концентрации добавки ЦКН-04С в электролите можно считать 5–10 мл/л.

Температура электролита оказывает влияние на его технологические характеристики. В электролите со средними значениями концентраций всех компонентов при температуре $<18^{\circ}\text{C}$ существенно снижается РС по металлу и падает КС. Повышение температуры $>35^{\circ}\text{C}$ вызывает матовость и шероховатость кадмиевых покрытий – вероятно, в результате десорбции органических добавок. Таким образом, допустимым диапазоном температуры электролита можно считать $18\text{--}35^{\circ}\text{C}$.

Исследования зависимости выхода кадмия по току от катодной плотности тока проведены для электролитов с минимальным и максимальным содержанием компонентов в пределах рекомендуемого диапазона при $\text{pH}=4$ и температуре электролита 25°C (рис. 1). В электролите с минимальной концентрацией компонентов наблюдается более сильный спад выхода кадмия по току с ростом катодной плотности тока, чем для электролита с максимальной концентрацией компонентов. При этом для второго электролита верхний предел плотности тока, при котором осаждаются светлые покрытия, составляет $2,5 \text{ A}/\text{дм}^2$, в то время как в первом электролите уже при плотности тока $1,25 \text{ A}/\text{дм}^2$ осаждается темное покрытие.



Рис. 1. Зависимость выхода кадмия по току от катодной плотности тока для электролитов с минимальным (1) и максимальным (2) содержанием компонентов в пределах рекомендуемого диапазона при $\text{pH}=4$ и температуре электролита 25°C

Для электролита с оптимальным содержанием компонентов проведены исследования зависимости катодного выхода кадмия по току от pH (рис. 2) и температуры (рис. 3) электролита.

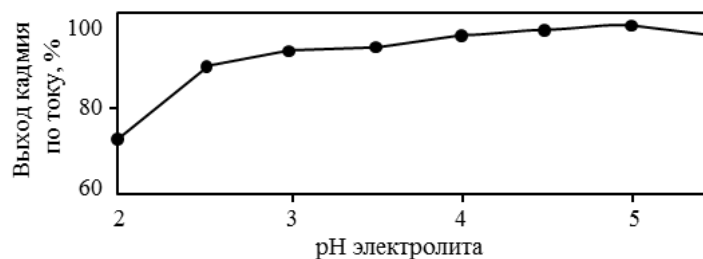


Рис. 2. Зависимость выхода кадмия по току от pH электролита с оптимальным содержанием компонентов при катодной плотности тока $1 \text{ A}/\text{дм}^2$ и температуре электролита 25°C

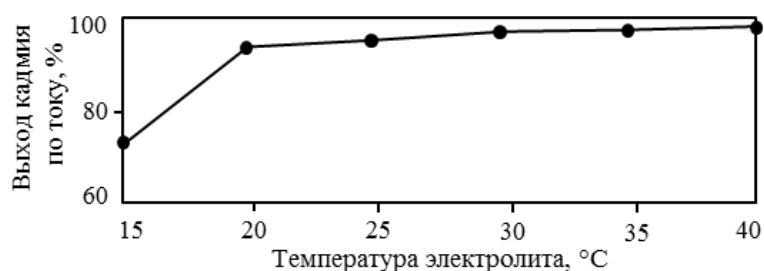


Рис. 3. Зависимость выхода кадмия по току от температуры электролита с оптимальным содержанием компонентов при катодной плотности тока 1 А/дм^2 и $\text{pH}=4$

Исследование влияния pH электролита на процесс осаждения кадмия показало, что в электролите со средними значениями концентраций всех компонентов при $\text{pH}<3$ существенно снижается катодный выход по току кадмия даже при низких плотностях тока, а при $\text{pH}>5$ сужается диапазон осаждения качественных покрытий – при низких плотностях тока покрытия становятся более темными, а при высоких – наблюдается сильный подгар вплоть до образования черных губчатых осадков. Таким образом, допустимым диапазоном pH электролита можно считать 3–5 ед. При температуре электролита $<20^\circ\text{C}$ резко снижается катодный выход по току, а при температуре электролита 40°C осаждаются темные и шероховатые кадмиевые покрытия.

Исследования зависимости РС электролита кадмирования от катодной плотности тока (рис. 4) проведены для электролитов с минимальным, максимальным и средним оптимальным содержанием компонентов. Характер хода кривых зависимости РС от плотности тока определяется зависимостью катодного выхода по току от плотности тока, представленной на рис. 4: при увеличении плотности тока до 1 А/дм^2 выход кадмия по току падает более интенсивно, чем при плотности тока $>1 \text{ А/дм}^2$, а при увеличении плотности тока $>1,25 \text{ А/дм}^2$ выход кадмия практически не меняется, что и объясняет снижение РС электролита при таких плотностях тока.

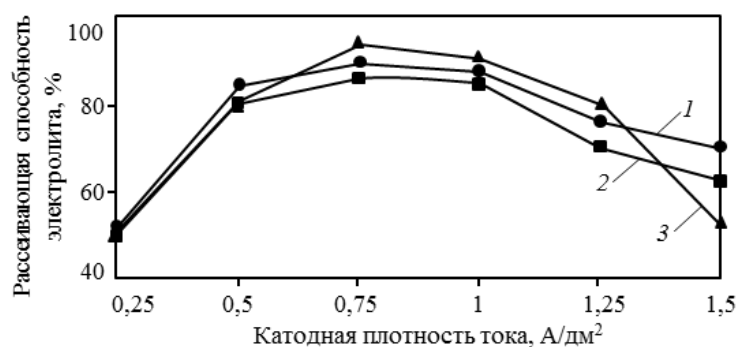


Рис. 4. Зависимость рассеивающей способности от катодной плотности тока для электролитов с минимальным (1), максимальным (2) и средним оптимальным (3) содержанием компонентов в пределах рекомендуемого диапазона при $\text{pH}=4$ и температуре электролита 25°C

Исследования кроющей способности электролита кадмирования проведены для электролитов с минимальным (1), максимальным (2) и средним оптимальным (3) содержанием компонентов. Результаты исследования представлены в табл. 1. Для сравнения представлены данные по КС для цианистого электролита [21].

Таблица 1

Кроющая способность электролитов кадмирования

Электролит	Температура электролита, °С	рН	Кроющая способность по методу		Качество покрытия
			1 (в с)	2 (в %)	
1	20	4	<3	92	Светлое гладкое
	25		<3	94	
	30		<3	94	
2	20	4	<3	94	Светлое гладкое
	25		<3	95	
	30		<3	95	
3	20	4	<3	95	Светлое гладкое
	25		<3	95	
	30		<3	95	
Цианистый*	20	>10	<3	92	Светлое полублестящее

* Состав, г/л: 30 CdO; 100 NaCN; 50 Na₂SO₄; 1 NiSO₄; 30 NaOH.

При наличии в составе сульфатно-аммонийного электролита кадмирования добавки ЦКН-04 его КС несколько превосходит КС цианистого электролита кадмирования, а покрытия остаются светлыми даже при достижении толщины 12 мкм.

Высокую КС сульфатно-аммонийного электролита кадмирования с добавкой ЦКН-04 можно проиллюстрировать на конкретном примере кадмирования сложнопрофилированной детали «бугель» (рис. 5). Для нее требуется наличие покрытия в нескругленных прямых углах внутри двух боковых отверстий (точка 2) и покрытие толщиной не менее 2 мкм на дне этих отверстий (точка 3). Кроме того, недопустимо наличие контактного следа от подвеса (точка 4). При кадмировании в хлоридно-аммонийном электролите кадмирования отсутствие контактного пятна и прокрытие дна отверстий осуществляется путем перевешивания детали с переворотом на 180 град в процессе нанесения покрытия. Прокрытие углов при этом возможно только при кратковременном введении в отверстия дополнительных анодов с толчком тока.

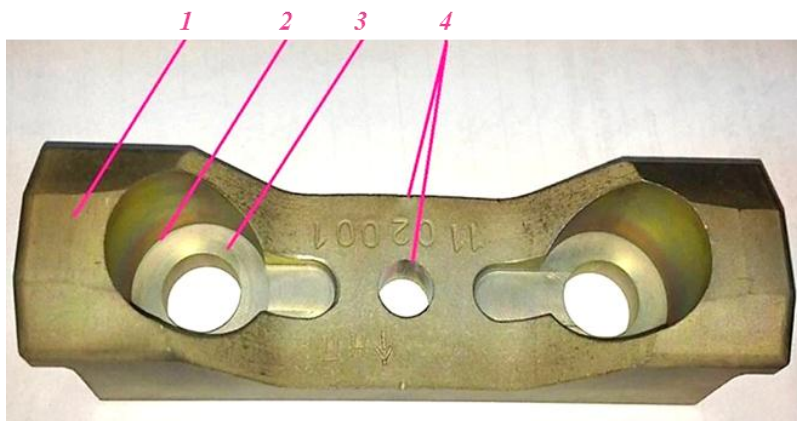


Рис. 5. Деталь «бугель» с кадмиевым покрытием (1–4 – критические точки – см. текст)

В исследуемый электролит эту деталь помещали на медном крючке, пропущенном через среднее отверстие, с двумя точками контакта (точки 4) – отверстием вверх под углом ~20 град. Нанесение покрытия осуществляли при средней по суммарной площади плотности тока 0,8 А/дм² в одном положении. После нанесения покрытия его толщина на внешней поверхности детали колеблется в пределах 9–12 мкм (в точке 1 толщина 12 мкм), углы (точка 2) прокрыты, толщина покрытия на дне глухого отверстия (точка 3) составляет 4 мкм, контактное пятно отсутствует (точка 4).

Проведенные исследования работоспособности сульфатно-аммонийного электролита кадмирования с добавкой ЦКН-04 показали его высокую работоспособность: после пропускания через электролит количества электричества 400 А·ч/л с корректировкой pH и при содержании добавки ЦКН-04 основные параметры электролита (КС, РС и выход кадмия по току) практически не изменились.

Главным фактором, ухудшающим механические свойства сталей, является их наводороживание как в операциях подготовки поверхности сталей, так и при нанесении покрытия [16, 17]. Наводороживание сталей вызывает уменьшение их пластичности при кратковременном разрыве и снижение длительной прочности. Такое изменение механических свойств принято называть водородной хрупкостью.

Для изучения влияния технологии нанесения кадмиевого покрытия из сульфатно-аммонийного электролита с добавкой ЦКН-04 на механические свойства стали 30ХГСА на образцы наносили кадмиевое покрытие толщиной 15 мкм при плотности тока 1,25 А/дм². Обезводороживание образцов с кадмиевым покрытием осуществляли в сушильном шкафу при температуре 200°С в течение 2 и 4 ч.

Проведены также испытания образцов с кадмиевым покрытием, нанесенным из сульфатно-аммонийного электролита с добавкой ЦКН-04 в присутствии добавки ЦКН-04С в количестве 10 мл/л. Кадмиевое покрытие наносили толщиной 15 мкм при плотности тока 1,25 А/дм². Обезводороживание образцов с кадмиевым покрытием осуществляли в сушильном шкафу при температуре 200°С в течение 2 ч.

Изменение механических свойств образцов из стали 30ХГСА после проведения термообработки представлено в табл. 2. Установлено, что процесс гальванического нанесения кадмиевого покрытия толщиной до 15 мкм с последующим обезводороживанием в течение 2–4 ч не оказывает существенного влияния на прочностные (σ_b , $\sigma_{0,2}$) и пластические (δ_5 , ψ) характеристики стали 30ХГСА с пределом прочности $\sigma_b=1079–1275$ МПа.

Таблица 2

Механические свойства образцов из стали 30ХГСА после проведения термообработки

Условный номер образца	Режим обезводороживания	Диаметр образца, мм	Условный предел текучести	Предел прочности при растяжении	Относительное удлинение δ	Относительное сужение ψ
Без покрытия						
1	Без обезводороживания	5,00	1030	1130	14,5	55,0
2		5,00	1030	1130	15,0	55,5
3		4,99	1020	1140	16,0	56,0
С кадмиевым покрытием из электролита с ЦКН-04						
4	200°С, 2 ч	4,98	1030	1130	15,0	56,0
5		5,01	1020	1130	14,5	56,0
6		5,01	1020	1120	15,0	56,0
7	200°С, 4 ч	5,00	1030	1130	15,0	57,0
8		5,00	1020	1130	15,0	56,0
9		5,00	1020	1130	15,0	56,0
С кадмиевым покрытием из электролита с ЦКН-04 и ЦКН-04С						
10	200°С, 2 ч	5,02	1020	1120	15,0	56,0
11		5,02	1010	1120	16,5	57,0
12		5,01	1020	1120	17,0	57,0

Замедленное хрупкое разрушение (ЗХР) высокопрочных стальных изделий с концентраторами напряжений является одним из наиболее опасных видов хрупкого разрушения, поскольку проявляется в результате длительного действия статических нагрузок и происходит, как правило, внезапно при номинальных напряжениях ниже

предела текучести [22]. Ранее установлено, что этот вид разрушения преимущественно реализуется в высокопрочных сталях, содержащих мартенсит: мартенситных, мартенситостареющих и метастабильных аустенитных сталях [23].

Проведены испытания на склонность к ЗХР при нагрузке равной $0,8\sigma_B^H$, и базе испытания 480 ч. Испытания проводили на круглых стальных образцах из углеродистой стали 30ХГСА с искусственным концентратором напряжения (надрезом) с нанесенным кадмиевым покрытием толщиной 15 мкм после обезводороживания при температуре 200°C в течении 2 и 4 ч. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний на склонность к замедленному хрупкому разрушению

Вид покрытия (режим обезводороживания)	$0,8\sigma_B^H$, МПа	Площадь сечения, мм ²	Нагрузка, кгс	Время до разрушения, ч
Кд15.хр (200°C, 2 ч)	1336	16,3	2175	550
	1336	16,0	2150	550
	1336	16,2	2165	550
Кд15.хр (200°C, 4 ч)	1336	16,3	2165	550
	1336	16,3	2175	550
	1336	16,2	2165	550

В результате испытаний на склонность к ЗХР установлено, что базу испытаний 480 ч выдержали образцы из стали 30ХГСА с кадмиевым покрытием после обезводороживания при температуре 200°C и в течение 2 и 4 ч.

Заключения

Результаты проведенных лабораторных исследований показали, что сульфатно-аммонийный электролит кадмирования с добавкой ЦКН-04 позволяет наносить качественные покрытия с кадмием на сложнопрофилированные изделия с высокими рассеивающей и кроющей способностями, имеет высокую эксплуатационную стабильность и может быть применен для кадмирования сложнопрофилированных деталей в серийном производстве.

Для улучшения внешнего вида кадмиевых покрытий в области низких катодных плотностей тока и уменьшения влияния вредных примесей допускается введение в электролит добавки ЦКН-04С.

На основании проведенных механических испытаний установлено, что технология нанесения кадмиевого покрытия из сульфатно-аммонийного электролита с добавкой ЦКН-04 не влияет на механические свойства сталей средней прочности типа 30ХГСА.

Разработана технологическая рекомендация ТР1.2.2504–2015 «Процесс кадмирования деталей из углеродистой стали средней прочности» из сульфатно-аммонийного электролита кадмирования с добавкой ЦКН-04.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
3. Маркова Е.С., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б., Громов В.И. Мартенситостареющие стали – новые перспективные материалы для валов ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 81–84.

4. Иванов Е.В. Создание износостойких и антифрикционных материалов и покрытий для космического корабля «Буран» // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S1. С. 142–151.
5. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // *Авиационная промышленность*. 2009. №4. С. 36–46.
6. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность при морской атмосфере. Ч. 1. Факторы влияния (Обзор) // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №12. С. 6–18.
7. 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 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
8. Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое производство. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Глобус, 2002. 352 с.
9. Вячеславов П.М. Электролитическое осаждение сплавов. Л.: Машиностроение, 1986. 112 с.
10. Таранцева К.Р., Николотов А.Д. Электроосаждение сплава олово-цинк из стабилизированного пирофосфатного электролита как альтернатива кадмиевому покрытию // *Коррозия: материалы, защита*. 2014. №3. С. 27–30.
11. Целуйкин В.Н., Корешкова А.А. О коррозионных свойствах композиционных покрытий цинк–углеродные нанотрубки // *Коррозия: материалы, защита*. 2014. №3. С. 31–34.
12. Виноградов С.С., Губенкова О.А., Мамонтова Н.Н., Никифоров А.А., Балахонов С.В. Свойства модифицированного цинкового покрытия // *Коррозия: материалы, защита*. 2015. №3. С. 24–30.
13. Каримова С.А., Павловская Т.Г. Разработка способов защиты от коррозии конструкций, работающих в условиях космоса // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №4. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2016).
14. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Балахонов С.В. Замена кадмия. Этап 1. Повышение защитной способности цинковых покрытий: термоиммерсионное и модифицированное покрытия // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 53–60. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-53-60.
15. Вайнер Я.В., Дасоян М.А. Технология электрохимических покрытий. М.: Машгиз, 1962. 468 с.
16. Максимчук В.Н., Половников С.П. Водородное растрескивание высокопрочных сталей после нанесения гальванохимических покрытий. М.: Энергоатомиздат, 2002. 320 с.
17. Белоглазов С.М. Наводороживание стали при электрохимических процессах. Л.: Изд-во ЛГУ, 1975. 412 с.
18. Максимчук В.Н., Максимчук Е.В. Проникновение водорода через сталь при кадмировании с подслоями // *Электрохимия*. 1977. Т. XIII. Вып. II. С. 1646–1652.
19. Кудрявцев Н.Т. Электрохимические покрытия металлами. М.: Химия, 1979. 352 с.
20. Смирнов К.Н., Архипов Е.А., Кравченко Д.В. К вопросу о крошащей способности электролитов // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2015. Т. 23. №3. С. 30–34.
21. Смирнов К.Н., Кравченко Д.В., Архипов Е.А. Крошащая способность электролитов кадмирования // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2013. Т. 21. №4. С. 30–32.
22. Ажогин Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. М.: Металлургия, 1974. 245 с.
23. Коррозионное растрескивание металлов / под общ. ред. В.В. Романова. М.: Машгиз, 1960. 186 с.