

УДК 621.357.74

С.С. Виноградов<sup>1</sup>, А.А. Никифоров<sup>1</sup>, С.В. Балахонов<sup>1</sup>**ЗАМЕНА КАДМИЯ. ЭТАП 1. ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИТНОЙ СПОСОБНОСТИ ЦИНКОВЫХ ПОКРЫТИЙ: ТЕРМОИММЕРСИОННОЕ И МОДИФИЦИРОВАННОЕ ПОКРЫТИЯ**

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-53-60

Проведены сравнительные ускоренные коррозионные испытания модифицированного и термоиммерсионного цинковых и кадмиевых покрытий, а также испытания на адгезию и влияние на механические свойства сталей 30ХГСА и 30ХГСН2А. Показано, что в условиях ускоренных коррозионных испытаний в камере солевого тумана (КСТ) в течение 2060 ч модифицированное покрытие по защитной способности и коррозионной стойкости сопоставимо с кадмиевым покрытием. Исследованные покрытия обладают удовлетворительной адгезией к стальной основе и имеют приблизительно равную прочность сцепления с лакокрасочным покрытием. Технологии нанесения термоиммерсионного покрытия (так же как и модифицированного) не влияют на склонность сталей, в том числе высокопрочных, к замедленному хрупкому разрушению (ЗХР). В то же время, согласно результатам испытаний на ЗХР, после выдержки в КСТ в течение 48 ч модифицированное покрытие существенно снижает кратковременную прочность сталей. Модифицированное покрытие также негативно влияет на малоцикловую усталость сталей, поэтому может быть рекомендовано для защиты от коррозии только сталей с пределом прочности до 1350 МПа.

**Ключевые слова:** термоиммерсионное и модифицированное кадмиевые покрытия, защитная способность, адгезия, механические свойства сталей 30ХГСА и 30ХГСН2А.

The comparative accelerated corrosion tests of modified and thermo-immersed zinc and cadmium coatings, as well as adhesion and mechanical tests of properties of 30KhGSA and 30KhGSN2A steels has been carried out. Modified coatings were shown to have comparable protective properties with cadmium coatings in salt spray environment during 2060 hours test. The investigated coatings possess satisfactory adhesion to steel substrate that is approximately equal to laquer and paint coating. The technology of putting of the thermo-immersed and modified coatings does not affect on tendency of steels (including high-strength) to slow-brittle-destruction. The modified coating decreases short-term durability of the steel according to slow-brittle-destruction test after 48 hours immersion in salt spray chamber. In addition, the modified coating negatively influences on low-cyclic fatigue of the steels. Therefore, the modified coatings can be recommended for anti-corrosion protection of steels with strength less than 1350 MPa.

**Keywords:** thermo-immersed, modified, cadmium coatings, protection property, adhesion, mechanical properties of 30XHGSA and 30HGSN2A steels.

<sup>1</sup>Федеральное 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

**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 в ВИАМ проведены комплексные исследования высокопрочных мартенситостареющих сталей с пределом прочности >1570 МПа, позволившие рекомендовать их для изготовления различных деталей авиационной техники [3–6]. Сравнительные коррозионные испытания образцов из высокопрочных сталей без покрытий показали, что эти стали не могут быть применены без защиты от атмосферной коррозии. 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 [7].

Многие годы в России велись работы по замене кадмиевого покрытия. Разрабатываемые покрытия сравнивали с кадмиевым главным образом по защитной способности [8–17]. Однако в большинстве работ не уделялось должного внимания влиянию технологии нанесения альтернативных покрытий на механические свойства сталей. Главным фактором, ухудшающим механические свойства сталей, является их наводороживание при нанесении покрытия [18–20]. Для выявления наводороживания и определения степе-

ни снижения механических свойств необходимо проведение сложных испытаний [21–27].

В ВИАМ разработаны и запатентованы способы нанесения термоиммерсионного покрытия [28], предусматривающего нанесение на цинковый подслои оловянного иммерсионного покрытия с последующей термической обработкой, и модифицированного цинкового покрытия [29], состоящего из фосфатированного цинка, легированного небольшим количеством олова.

Данная работа посвящена изучению свойств модифицированного и термоиммерсионного цинковых покрытий в сравнении с кадмиевым с целью определения возможности замены последнего в самолетостроении.

### Материалы и методы

Для выполнения работы изготовлены образцы из стали 30ХГСА с пределом прочности  $\sigma_b=1450\pm 50$  МПа и стали 30ХГСН2А с пределом прочности  $\sigma_b=1800$  МПа. Все детали из высокопрочных сталей после окончательной механической обработки подвергаются дополнительной специальной обработке для снятия растягивающих напряжений, которые создаются при шлифовании.

Составы электролитов для нанесения покрытий и растворов фосфатирования и хроматирования, а также режимы нанесения и обезводороживания приведены в патентах [28, 29]. В связи с тем, что высокопрочные стали чувствительны к водородному и коррозионному растрескиванию, выбраны электролиты и режимы нанесения цинковых и кадмиевых покрытий, обеспечивающие высокий (близкий к 100%) катодный выход металла по току.

Толщину исследуемых покрытий контролировали магнитным толщиномером PosiTector 6000.

Защитную способность покрытий определяли методом ускоренных коррозионных испытаний в камере солевого тумана (КСТ) по ГОСТ 9.308 при температуре  $35\pm 2^\circ\text{C}$  и относительной влажности 70% при непрерывном распылении нейтрального 5%-ного водного раствора хлористого натрия.

Адгезию исследуемых покрытий к стальной подложке оценивали на трех образцах по ГОСТ 9.302 методом нанесения сетки царапин (метод рисок). Адгезию лакокрасочных покрытий к исследуемым покрытиям оценивали по ISO 2409. Для этого на образцы было нанесено лакокрасочное покрытие системы: грунт+эмаль марки Aerodur. Адгезию определяли методом надрезов с использованием липкой ленты на полиэтилентерифталатной основе. Оценку адгезии проводили в исходном состоянии и после выдержки образцов в дистиллированной воде до 14 сут.

Исследования наводороживания стальной основы путем определения склонности образцов с покрытиями к замедленному хрупкому разру-

шению (ЗХР) на образцах с надрезами выполнены при статическом нагружении на машинах ZST 3/3 (3000 кг) при напряжении, равном 70–80% от предела прочности при разрыве образцов с надрезами ( $\sigma_b^H$ ).

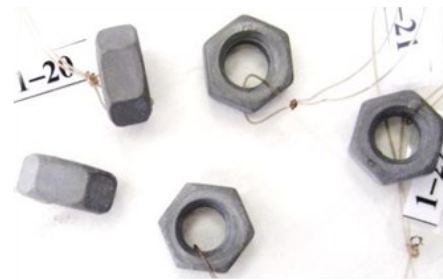
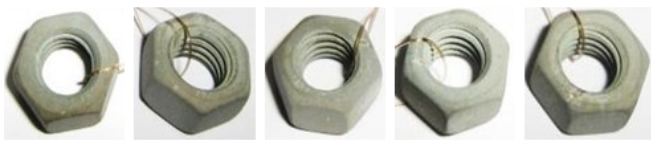
Испытания на малоцикловую усталость (МЦУ) проводили по ГОСТ 25.502 при разных уровнях напряжения. Оценку усталостных характеристик сталей после нанесения покрытий выполнили на резонансной усталостной машине «Шенк» с силоизмерителем от машины MTS-5т в соответствии с АІТМ 1-0011. Параметры нагружения образцов: цикл синусоидальный; максимальное напряжение  $\sigma_{\max}=882\text{--}1274$  МПа; коэффициент асимметрии цикла  $R=0,1$ ; частота нагружения 40 Гц. Испытания проводили при температуре  $21^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха 64%. При каждом уровне напряжений испытывали 5 цилиндрических образцов. Перед нанесением покрытий образцы подвергнуты пескоструйной обработке.

### Результаты

#### Коррозионные свойства

Для проведения ускоренных коррозионных испытаний в КСТ на болты и гайки М8 нанесены исследуемые покрытия, причем толщина покрытий на болтах составляла 12 мкм, а на гайках 6 мкм. Результаты коррозионных испытаний представлены на рис. 1–4. Видно, что цинковое покрытие обладает наименьшей защитной способностью: на гайках отдельные точки коррозии на стали появились через 268 ч, после 678 ч испытаний практически вся поверхность гаек покрыта продуктами коррозии стали. На болтах первые очаги коррозии на стали появились через 678 ч испытаний. Термоиммерсионное покрытие обладает защитной способностью почти в 2 раза большей, чем у цинкового покрытия: на гайках первые очаги коррозии на стали появились через 1231 ч испытаний, а болты выдержали весь цикл испытаний в течение 2060 ч. Еще более высокой защитной способностью обладает модифицированное цинковое покрытие: на гайках и болтах за весь цикл испытаний в течение 2060 ч продуктов коррозии на стали не обнаружено.

Коррозионное поведение исследованных покрытий проявлялось по-разному. Продукты коррозии цинкового покрытия проявляются в виде объемного белого налета. У термоиммерсионного покрытия продукты коррозии также имеют белый цвет, но проявляются в виде необъемных подтеков. Как у цинкового, так и у термоиммерсионного покрытий довольно быстро (через ~800 ч) продуктами коррозии покрытия заполняется практически вся поверхность деталей. Продукты коррозии модифицированного покрытия проявляются в виде отдельных белых пятен. Кадмиевое покрытие обладает наибольшей коррозионной стойкостью, за весь цикл испытаний



До испытаний

После испытаний в КСТ в течение 2060 ч

Рис. 1. Внешний вид кадмиевого покрытия Кд6-12.Фос.окс



До испытаний

После испытаний в КСТ в течение 2060 ч

Рис. 2. Внешний вид модифицированного покрытия Ц-Об-12.Фос.окс





До испытаний

После испытаний в КСТ в течение 1231 ч

Рис. 3. Внешний вид термоиммерсионного покрытия Ц6-12+O<sub>конт.-хр</sub>



До испытаний

После испытаний в КСТ в течение 678 ч

Рис. 4. Внешний вид цинкового покрытия Ц6-12.хр

Таблица 1

## Адгезия лакокрасочных покрытий

Вид покрытия	Адгезия, балл					
	в исходном состоянии	после выдержки в дистиллированной воде, сут				
		1	3	7	10	14
Кадмиевое Кд12.Фос.окс	1	1	1	1–2	2–3	2–3 от металла
Модифицированное Ц-О12.Фос.окс	1	1	1	1–2	2–3	2–3 от металла
Термоиммерсионное Ц12+O <sub>конт.</sub> хр	1	1	1–2	1–2	2–3	3 от металла
Цинковое Ц12.хр	1	1	1–2	1–2	2–3	3 от металла

на болтах и гайках обнаружены единичные светлые точки.

Таким образом, модифицированное цинковое покрытие обладает защитными и коррозионными свойствами, наиболее близкими к аналогичным свойствам кадмиевого покрытия.

**Адгезия**

Сравнительные испытания на адгезию термоиммерсионного, модифицированного, цинкового и кадмиевого покрытий толщиной 12 мкм к стальной подложке проведены на предварительно отшлифованной или пескоструенной стальной поверхности. Адгезию покрытий оценивали качественно по ГОСТ 9.302 методом нанесения сетки царапин, после испытаний отслаивания покрытий между линиями и в сетке квадратов не наблюдали.

Вследствие того, что практически все кадмированные детали после сборки подвергаются окрашиванию, проведены испытания по ГОСТ 15140 адгезионной способности лакокрасочных покрытий авиационного применения марки Aerodur толщиной 60 мкм. Полученные данные по адгезии лакокрасочных покрытий (табл. 1) показывают, что в исходном состоянии лакокрасочные покрытия обладают высокой адгезией к исследуемым покрытиям (балл 1). Выдержка в дистиллированной воде приводит к снижению адгезии. При этом установлено, что адгезия сравниваемых покрытий находится на одном уровне: соответствует по ISO 2409 квалификации 1–2 в течение 7 сут испытаний и квалификации 2–3 в течение 14 сут испытаний в дистиллированной воде.

Таким образом, все исследованные покрытия по адгезии к металлической подложке (отшлифованная и пескоструенная поверхность) находятся на уровне адгезии кадмиевого покрытия. По адгезии лакокрасочных покрытий к исследованным покрытиям цинковое и термоиммерсионное покрытия незначительно уступают модифицированному и кадмиевому покрытиям.

**Влияние технологии нанесения покрытия на механические свойства сталей**

Главным фактором, ухудшающим механические свойства сталей, является их наводороживание

как в операциях подготовки поверхности сталей, так и при нанесении покрытия [18–20]. Наводороживание сталей вызывает уменьшение их пластичности при кратковременном разрыве и понижение длительной прочности. Такое изменение механических свойств принято называть водородной хрупкостью.

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 [30]. Ранее было установлено, что этот вид разрушения преимущественно реализуется в высокопрочных сталях, содержащих мартенсит: мартенситных, мартенситостареющих и метастабильных аустенитных [31].

В данной работе исследования на ЗХР проводили на высокопрочной стали 30ХГСН2А с пределом прочности 1800 МПа при напряжении, равном 75% от предела прочности образцов с надрезом ( $\sigma_b^H$ ). Образцы из такой стали с термоиммерсионным, модифицированным и кадмиевым покрытиями, прошедшие обезводороживание в течение 24 ч, не разрушились при требуемой длительности испытаний 200 ч. Аналогичные данные получены на образцах из стали средней прочности 30ХГСА с пределом прочности 1450±50 МПа: образцы из такой стали с термоиммерсионным, модифицированным и кадмиевым покрытиями, прошедшие обезводороживание в течение 8 ч, не разрушились при требуемой длительности испытаний 200 ч.

Помимо воздействия технологии нанесения термоиммерсионного, модифицированного и кадмиевого покрытий на пластичные свойства высокопрочной стали 30ХГСН2А проведена оценка усталостных характеристик (МЦУ) этой стали после нанесения исследуемых покрытий. Испытания проведены в соответствии с АИТМ 1-0011. На рис. 5 представлено влияние технологий нанесения покрытий на малоцикловую усталость (МЦУ) стали 30ХГСН2А.

Как видно из приведенных на рис. 5 данных, модифицированное цинковое покрытие снижает

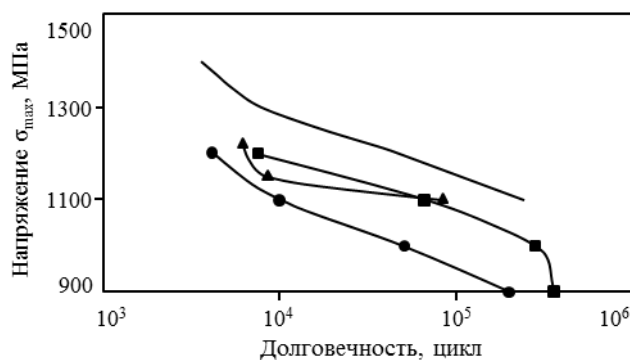


Рис. 5. Влияние технологий нанесения покрытий на малоцикловую усталость высокопрочной стали 30ХГСН2А:

— без покрытия; ■ – Кд15.хр; ▲ – Ц15+О<sub>конт.</sub>хр; ● – Ц-О15.Фос.окс

Таблица 2

**Влияние технологии нанесения модифицированного покрытия на склонность стали 30ХГСА к ЗХР без и с предварительной выдержкой в КСТ**

Материал основы	Вид покрытия	Время обезводороживания, ч	Выдержка в КСТ, ч	Разрушающая нагрузка, МПа		Время до разрушения, ч
				$\sigma_B^H$	75% $\sigma_B^H$	
Сталь 30ХГСА ( $\sigma_B=1450\pm 50$ МПа)	Ц-О12.Фос.окс	>8	–	2240	1676	>200
	Кд12.хр			2247	1685	>200
	Ц-О12.Фос.окс	>8	48	2127	1597	12
	Кд12.хр			2170	1627	84

Таблица 3

**Влияние технологии нанесения модифицированного цинкового покрытия на склонность стали 30ХГСА ( $\sigma_B=1350$  МПа) к ЗХР с предварительной выдержкой в КСТ в течение 48 ч**

Вид покрытия	Время обезводороживания, ч	Разрушающая нагрузка, МПа		Время до разрушения (>200 ч), ч
		$\sigma_B^H$	75% $\sigma_B^H$	
Ц-О12.Фос.окс	>8	2146	1617	648
	>23	2264	1695	864

усталостную прочность высокопрочной стали 30ХГСН2А в значительно большей степени, чем термоиммерсионное и кадмиевое покрытия. Так, при нагрузке 1078 МПа число циклов до разрушения образцов из стали 30ХГСН2А при нанесении термоиммерсионного и кадмиевого покрытий снижается в ~3 раза, а при нанесении модифицированного покрытия – на порядок.

Аналогичная картина наблюдается и на стали средней прочности 30ХГСА.

Таким образом, несмотря на высокую защитную способность, модифицированное покрытие не пригодно для нанесения на высокопрочные стали, поэтому следует определить область применения такого покрытия. Для этого проведены дополнительные исследования склонности к ЗХР стали 30ХГСА с пределом прочности 1450±50 МПа с модифицированным покрытием при напряже-

нии, равном 75% от предела прочности образцов с надрезом ( $\sigma_B^H$ ), с предварительной выдержкой в КСТ в течение 48 ч и без выдержки в КСТ.

Данные, полученные при испытании образцов с покрытиями без и с предварительной выдержкой в камере солевого тумана, приведены в табл. 2.

Из приведенных данных видно, что предварительная выдержка образцов из стали 30ХГСА ( $\sigma_B=1450\pm 50$  МПа) в КСТ в течение 48 ч перед проведением испытаний на склонность к ЗХР приводит к существенному снижению времени до разрушения стальных образцов: образцы разрушаются через 12 и 84 ч. При этом кадмированные образцы выдержали испытания в течение 200 ч, в том числе и после выдержки в КСТ.

В связи с этим дополнительно проведены испытания образцов из стали 30ХГСА с пределом

прочности 1350 МПа с модифицированным покрытием на склонность к ЗХР с предварительной выдержкой в КСТ. Обезводороживание образцов с покрытием проводили в течение определенного количества времени – до 8 и 23 ч. Данные приведены в табл. 3.

Из данных табл. 3 видно, что все испытанные образцы прошли испытания в течение 200 ч без разрушения при напряжении  $75\% \sigma_{\text{в}}^{\text{H}}$ .

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать вывод о том, что для сталей с пределом прочности  $\geq 1450 \pm 50$  МПа нанесение модифицированного покрытия рекомендовано быть не может. Применение указанной технологической схемы возможно для деталей из сталей с пределом прочности до 1350 МПа.

#### Обсуждение и заключения

Проведены сравнительные испытания разработанных в ВИАМ термоиммерсионного и модифицированного покрытий и применяемого для защиты от коррозии стальных деталей в авиационной промышленности кадмиевого покрытия с целью замены последнего.

Проведенные сравнительные ускоренные коррозионные испытания в течение 2060 ч в КСТ показали, что модифицированное покрытие имеет защитную способность, сравнимую с защитной способностью кадмиевого покрытия; наименьшей защитной способностью обладает цинковое покрытие; защитная способность термоиммерсионного покрытия существенно уступает защитной способности как кадмиевого, так и модифицированного покрытия и несколько

выше защитной способности цинкового покрытия. Коррозионная стойкость исследованных покрытий располагается в аналогичной последовательности.

Установлено, что все исследованные покрытия имеют удовлетворительную адгезию к стальной основе и приблизительно одинаковую прочность сцепления с лакокрасочным покрытием.

Согласно испытаниям на кратковременную прочность технологии нанесения термоиммерсионного и модифицированного покрытий практически не оказывают влияния на склонность к ЗХР как сталей средней прочности, так и высокопрочных сталей.

По результатам испытаний на склонность к ЗХР установлено, что модифицированное покрытие после выдержки в КСТ в течение 48 ч существенно снижает кратковременную прочность сталей с пределом прочности при разрыве  $> 1450 \pm 50$  МПа.

Испытания на малоцикловую усталость показали практически одинаковое влияние на долговечность технологии нанесения термоиммерсионного и кадмиевого покрытий. В то же время технология нанесения модифицированного покрытия существенно ухудшает усталостные характеристики сталей.

Разработанные в ВИАМ термоиммерсионное и модифицированное покрытия в качестве защиты сталей от коррозии не могут полностью заменить кадмиевое покрытие. Только для сталей с пределом прочности при разрыве до 1350 МПа возможно применение модифицированного покрытия взамен кадмиевого.

#### 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.
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. Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М., Шалькевич А.Б., Петраков А.Ф. Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки на структуру, технологические, механические и коррозионные свойства высокопрочной коррозионно-стойкой стали переходного класса с повышенным содержанием азота // Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 31–36.
6. Тоньшева О.А., Вознесенская И.М., Елисеев Э.А., Шалькевич А.Б. Новая высокопрочная экономно-легированная азотсодержащая сталь повышенной надежности // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 84–88.
7. Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое производство / Под ред. проф. В.Н. Кудрявцева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Глобус. 2002. 352 с.
8. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
9. Каримова С.А., Павловская Т.Г. Разработка способов защиты от коррозии конструкций, работающих в условиях космоса // Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 02 (viam-works.ru).
10. Вячеславов П.М. Электролитическое осаждение сплавов. Л.: Машиностроение. 1986. 112 с.

11. 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.
12. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) //Коррозия: материалы, защита. 2013. №12. С. 6–18.
13. Проскуркин Е.В., Сухомлин Д.А. Анализ цинковых покрытий на основе их структурных и электрохимических свойств //Коррозия: материалы, защита. 2013. №10. С. 30–38.
14. 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.
15. Целуйкин В.Н., Корешкова А.А. О коррозионных свойствах композиционных покрытий цинк-углеродные нанотрубки //Коррозия: материалы, защита. 2014. №3. С. 31–34.
16. Neue Horizonte für den Korrosionsschutz durch Zinklamellen-Technologie //Galvanotechnik. 2011. V. 102. №9. P. 1996–1997.
17. Архипов В.Е., Дубравина А.А., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Хрущев М.М. Коррозионные свойства покрытий, нанесенных газодинамическим напылением //Коррозия: материалы, защита. 2014. №4. С. 33–38.
18. Белоглазов С.М. Наводороживание стали при электрохимических процессах. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1975. 412 с.
19. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Громов В.И. Развитие механизмов водородной и бейнитной хрупкости конструкционной стали в процессе эксплуатации крупногабаритных конструкций //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 88–93.
20. Никифоров А.А., Ульянов И.В. Влияние технологии нанесения защитных гальванических покрытий на механические свойства сталей средней прочности типа 30ХГСА /В сб. статей I Междуна-  
родной конф. «Деформация и разрушение материалов». М.: ИМЕТ. 2006. Т. 1. С. 405–407.
21. Турченков В.А., Баранов Д.Е., Гагарин М.В., Шишкин М.Д. Методический подход к проведению экспертизы материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 47–53.
22. Ерасов В.С., Байрамуков Р.Р. Роль фактора времени при проведении механических испытаний, обработке данных и представлении результатов //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 62–67.
23. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 35–40.
24. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенюк В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
25. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
26. Жегина И.П., Котельникова Л.В., Григоренко В.Б., Зимина З.Н. Особенности разрушения деформируемых никелевых сплавов и сталей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 455–465.
27. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость //Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 06 (viam-works.ru).
28. Способ нанесения комбинированного защитного покрытия на стальные детали: пат. 2427671 Рос. Федерация; опубл. 27.08.2011.
29. Способ получения покрытия для защиты от коррозии стальных деталей: пат. 2177055 Рос. Федерация; опубл. 20.12.2001.
30. Ажогин Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. М.: Металлургия. 1974. 245 с.
31. Романов В.В. Коррозионное растрескивание металлов. М.: Машгиз. 1960. 186 с.