

УДК 620.193

Е.Н. Каблов<sup>1</sup>, О.В. Старцев<sup>1</sup>**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИИ И СТАРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ (обзор)**

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52

*На основе материалов II Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы» (16–17 июля 2015 года, г. Геленджик) выполнен обзор исследований, представленных в докладах участников. Рассмотрены примеры моделирования и прогнозирования климатической стойкости полимерных композиционных материалов, особенности коррозии алюминиевых сплавов и деталей ГТД, эффективность применения защитных покрытий, методы испытаний строительных материалов и объектов инфраструктуры. Систематизированы основные задачи климатических испытаний на ближайший период.*

**Ключевые слова:** авиационные материалы, климатические испытания, коррозия, старение, биостойкость, защитные покрытия, моделирование.

*The review of the researches in the field of corrosion and ageing of materials was performed based on the proceedings of the II All-Russian scientific conference «Basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments: problems and solutions». The review contains examples of modeling and prediction of the polymer composites stability in the natural environments, corrosion properties of aluminum alloys and parts of gas turbine engines, the efficiency of protective coatings, testing methods of building materials and objects of infrastructure. The most important issues of corrosion and climatic testing were reviewed and systematized.*

**Keywords:** aviation materials, climatic testing, corrosion, ageing, microbiologically-influenced corrosion, protective coatings, modeling.

<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**

16–17 июля 2015 г. в Геленджикском центре климатических испытаний им. Г.В. Акимова – филиале Всероссийского института авиационных материалов (ГЦКИ ВИАМ) – состоялась II Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». ГЦКИ ВИАМ является единственным в РФ центром климатических испытаний, оснащенным современным оборудованием для исследований старения, коррозии и биоповреждений материалов, элементов конструкций при одновременном воздействии внешней среды, механических нагрузок и других факторов эксплуатации. Только за последние 3 года в ГЦКИ ВИАМ было проведено шесть международных и всероссийских конференций с участием ведущих ученых и специалистов РАН, университетов, государственных корпораций, интегрированных структур, государственных научных центров, конструкторских бюро, предприятий различных отраслей промышленности.

В обзоре рассмотрены фундаментальные и прикладные проблемы и перспективы развития

климатических испытаний материалов, представленные в докладах участников конференции.

**Проблемы испытаний материалов в различных климатических условиях**

В число важнейших Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года, разработанных во ФГУП «ВИАМ», входит направление «Климатические испытания для обеспечения безопасности и защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов, конструкций и сложных технических систем в природных средах». К числу задач этого направления относятся:

- создание национальной сети центров климатических испытаний;
- развитие методов климатических испытаний материалов;
- моделирование и прогнозирование климатической стойкости;
- защита от биологического поражения в природных средах;
- испытания при воздействии факторов космического пространства;
- комплексная защита образцов ВВСТ от природно-техногенных воздействий.

Таблица 1

## Актуальные проблемы климатических испытаний материалов

Проблема	Уровень решения в РФ
Выявление факторов, вызывающих коррозию и старение материалов	Исследовано подробно
Определение коррозионной агрессивности атмосферы в представительных регионах РФ	Имеется зарубежный опыт. Необходимо обновление российского стандарта
Моделирование и прогнозирование с учетом влияния сезонной неэквивалентности	Предложены новые модели. Требуется их доработка для регионов РФ
Совместное влияние климата и факторов эксплуатации	Системно не исследовано. Имеются отдельные примеры
Экспресс-контроль чувствительных показателей материалов на ранних стадиях коррозии и старения	Предложены новые чувствительные методы. Необходимо их проверка и стандартизация
Учет неоднородности старения по толщине образцов	Получены отдельные примеры
Обоснование концепции аддитивного воздействия агрессивных факторов	Нет надежного экспериментального обоснования
Расширение испытаний в жарком морском тропическом климате	Требуется создание новых площадок на Кубе, в Венесуэле, Индии и др.

В табл. 1 представлены актуальные проблемы климатических испытаний материалов и уровень их решения в РФ.

В докладе академика РАН Евгения Николаевича Каблова представлен анализ зарубежных исследований и работ, проведенных в ГЦКИ ВИ-АМ, в рамках проблем, указанных в табл. 1. Рассмотрим наиболее важные из них.

### Картографирование коррозионной агрессивности атмосферы

Для оценки коррозионной агрессивности развитые страны проводят многочисленные исследования, составляют карты региональной коррозионной агрессивности и проводят анализ влияния факторов окружающей среды на коррозию типовых материалов. За рубежом были реализованы масштабные оценки коррозионной агрессивности различных регионов [1–10]: Южная Америка – 75 испытательных площадок (проект МАСАТ), Новая Зеландия – 39 испытательных площадок, Австралия – 475 испытательных площадок.

Модель кинетики коррозии предложена кубинскими исследователями [2]. Потери массы металлических образцов  $K$  с учетом значимых для Кубы климатических факторов воздействия выражаются соотношением

$$K = at^b [Cl]^{c-1} \left(\frac{W}{D}\right)^d, \quad (1)$$

где  $t$  – продолжительность экспозиции;  $Cl$  – скорость выпадения хлоридов;  $W$  – количество осадков;  $D$  – количество дней с осадками;  $a, b, c, d$  – коэффициенты аппроксимации.

При оценке коррозионной агрессивности атмосферы Австралии предложен региональный индекс коррозионной агрессивности

$$I = 2,26\tau \sum [LR(t^{0,34})], \quad (2)$$

учитывающий  $\tau$  – продолжительность увлажнения по ISO 9223;  $L$  – удаленность от берега;  $R$  – характеристику рельефа;  $t$  – время ветров с морского побережья.

Отличительной особенностью Китая является разнообразие климатических зон – холодных, засушливых, тропических и промышленных; загрязнение почв щелочами, кислотами, солями; наличие пресноводных и соленых водоемов; высокие темпы индустриализации [7]. Индекс коррозионной агрессивности атмосферы Китая определяется следующими параметрами:

$$N = \frac{TOW}{T_{cp} S_4} + \sqrt{2SO_2 + 2Cl + NO_2} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{10} \ln \left( \frac{W}{D} \right) \right)^{\frac{[7-pH]}{23}}, \quad (3)$$

где  $TOW$  – время с относительной влажностью воздуха >80%;  $T_{cp}$  – средняя температура воздуха;  $S_4$  – продолжительность солнечного сияния;  $SO_2, Cl$  – соответственно скорости выпадения сульфатов и хлоридов;  $NO_2$  – концентрация диоксида азота;  $W$  – количество осадков;  $D$  – количество дней с осадками; pH – кислотность осадков.

Задачей ближайших лет является уточнение картографирования территории РФ по агрессивности атмосферы с учетом моделей (1)–(3).

### Влияние сезонной неэквивалентности

Сезонная неэквивалентность скорости коррозионного процесса часто обнаруживается при выставлении образцов в разное время года, особенно на небольшие сроки [1, 2]. При этом может меняться состав и морфология продуктов коррозии [3, 4]. Причина очевидна: для многих регионов характерны сезонные изменения таких климатических показателей, как температура, содержание коррозионно-агрессивных примесей, скорость

и направление ветра, количество и продолжительность осадков, относительная влажность и микробиологическая активность [5–7]. Одним из значимых факторов, определяющих сезонные колебания коррозионной агрессивности атмосферы в приморских регионах, является преобладающее направление ветров, выносящих хлориды и прочие коррозионно-активные примеси в растворенном виде [1, 8, 9].

В ГЦКИ ВИАМ проведена работа по исследованию сезонных колебаний коррозионной агрессивности приморской атмосферы в течение 2013 г. Выявлена значительная сезонная неэквивалентность коррозионной агрессивности атмосферы умеренно теплого климата в месте расположения ГЦКИ ВИАМ как по параметрам коррозионной агрессивности атмосферы (скорость выпадения коррозионно-агрессивных примесей и продолжительность увлажнения), так и по скорости коррозии и твердости поверхности стали Ст3 [10].

#### **Совместное влияние климата и факторов эксплуатации**

Для достоверной оценки стойкости металлических материалов и защитных покрытий необходимо не только испытания в среде, максимально приближенной к предполагаемому району эксплуатации, но и учет эксплуатационных факторов, таких как эрозия [11, 12], механические нагрузки [13, 14], облучение высокоэнергетическими частицами [15, 16] и солнечное ультрафиолетовое излучение [17].

Показано, что совместное коррозионное и эрозионное воздействие может увеличивать скорость коррозионного процесса в 4 раза за счет разрушения пленки пассивации и создания поврежденного слоя, склонного к коррозионному поражению. При этом коррозия ускоряет эрозионное разрушение [11]. Синергизм коррозионно-эрозионного процесса зависит от многих факторов, таких как мощность эрозионного воздействия [12] и обработка поверхности [18].

Совместное воздействие коррозионного поражения и механического нагружения недостаточно изучено из-за сложности одновременной реализации механического нагружения и коррозионных процессов [19, 20]. Испытания с учетом синергизма факторов также отличаются высокой погрешностью – так, при малом количестве образцов отклонения могут достигать 40% [21]. Наиболее распространены испытания, в которых материал последовательно подвергается коррозионному воздействию, а затем – циклическим механическим нагрузкам. Однако неоднократно показано, что последовательное воздействие указанных факторов неэквивалентно совместному: в некоторых случаях синергизм коррозионной среды и циклических механических нагрузок приводит к снижению стойкости к усталости на порядок [21].

Стойкость металлов к усталостному разруше-

нию снижается после выдержки материала в коррозионно-агрессивных условиях [22–24]: начиная с некоторого уровня коррозионного поражения, усталостные характеристики металла значительно ухудшаются [22, 24]. Усталостные испытания, проведенные на образцах из алюминиевого сплава, вырезанных из крыла самолета С-141, не только показали потенциальную опасность расслаивающей коррозии, но и выявили неэквивалентность снижения стойкости к усталости после эксплуатации и ускоренных испытаний [22].

Отдельные литературные научные источники свидетельствуют о значительном ускорении разрушения материала при наличии как коррозионного воздействия, так и механических нагрузок [14, 25]: питтинги, образующиеся на поверхности материала, служат концентраторами напряжений, ускоряющими разрушение [26–28] и уменьшающими остаточную прочность [29], а водородное охрупчивание ускоряет усталостное разрушение [13]. При синергичном воздействии механического нагружения и коррозионно-агрессивной среды изменяется не только стойкость к усталостному воздействию, но и характер роста трещин в материале [28, 30].

Наиболее распространены испытания образцов в коррозионной среде при статическом нагружении для оценки стойкости к коррозионному растрескиванию или последовательное коррозионное воздействие и усталостные испытания [13, 26]. Некоторые исследователи используют искусственное коррозионное воздействие, такое как погружение в солевой раствор во время усталостных испытаний [14, 25, 31, 32], или наносят повреждение, пропуская электрический ток через образец [20].

#### **Климатическое старение полимерных композиционных материалов (ПКМ) под действием механических нагрузок**

В литературных научных источниках выделяются различные факторы окружающей среды, имеющие влияние на физико-механические свойства композитов. Среди них наиболее значимыми считаются: ультрафиолетовое излучение [33–35], относительная влажность [36–39] и температура окружающей среды [40].

Для максимально достоверной оценки климатического старения ПКМ необходимо контролировать и учитывать следующие процессы и превращения: пластификацию связующего атмосферной влагой; набухание (увеличение толщины) при сорбции влаги; деструкцию связующего под действием солнечной УФ-радиации и кислорода воздуха; гидролиз связующего под действием влаги; доотверждение связующего, активируемое температурой и пластифицирующим воздействием влаги; разориентацию органических волокон под действием солнечной УФ-радиации, термовлажностного циклирования и механических нагрузок;

структурную релаксацию и усадку волокон, образующих каркас из армирующего наполнителя; структурную релаксацию связующего; образование пор, микротрещин и других микродефектов в объеме связующего и на границе «полимер–наполнитель»; образование поверхностных трещин, расслоений и крупных дефектов. Количественный контроль перечисленных превращений при экспонировании в натуральных климатических условиях формирует основу для достоверного прогнозирования механических свойств ПКМ в заданный период эксплуатации [41].

Совместное влияние факторов внешней среды в большей степени сказывается на кинетике изменения свойств композиционных материалов, чем их отдельное воздействие. Причины и закономерности изменения свойств композитов при совместном воздействии факторов окружающей среды остаются в настоящее время до конца не изученными [42]. Например, совместное воздействие ультрафиолетового излучения и конденсации приводит к увеличению модуля упругости эпоксидных композитов [42, 43], а совместное действие солнечного излучения и кислотных дождей синергично ускоряет разрушение полипропилен-талковых композитов [44].

В настоящее время испытания образцов и конструкций-подобных элементов из ПКМ чаще всего затрагивают либо воздействие окружающей среды [45, 46], либо механических нагрузок [47, 48]. Испытания материалов при совместном воздействии окружающей среды и механических нагрузок более предпочтительны ввиду большей достоверности результатов [42].

Неэквивалентность последовательного воздействия климатических факторов и ударных нагрузок последовательному воздействию ударных нагрузок и климатического воздействия показана в работе [49]. Так, у композита, подвергнутого ударному воздействию после влагонасыщения, остаточная прочность при сжатии снизилась больше, чем у композита, предварительно подвергнутого ударному воздействию, а потом насыщенному влагой [49].

Исследования показывают, что воздействие механических нагрузок значительно ускоряет разрушение образцов и соединений из ПКМ в условиях окружающей среды. Причем скорость и интенсивность деградации композитов, помещенных в одинаковые условия, зависят от типа приложенной нагрузки [42].

#### **Экспресс-контроль на ранних стадиях коррозии и старения**

Разработка эффективных мероприятий по защите узлов и деталей авиационной техники от коррозии и старения затруднена тем, что современные материалы обладают достаточной коррозионной стойкостью. По этой причине для полу-

чения достоверных сведений о прочностных характеристиках требуется длительная экспозиция. Например, для новых коррозионностойких сплавов [50, 51] потери предела прочности за 12 мес экспозиции в районе с повышенной коррозионной агрессивностью атмосферы (9 баллов по ГОСТ 9.039) составляют  $\leq 5\%$  от исходных значений [52]. В связи с этим представляют интерес такие методы диагностики материалов, которые крайне чувствительны даже к незначительным изменениям свойств, – например, исследования рельефа или микротвердости поверхности.

Сочетание традиционных методов оценки коррозии с методами анализа изображений и твердости индентации позволяет сопоставлять коррозионную стойкость различных материалов, подвергнутых воздействию внешней агрессивной среды, оценивать степень повреждений и прогнозировать дальнейшее развитие коррозионного разрушения [53, 54].

#### **Испытания в жарком морском тропическом климате**

Наиболее разрушительно для материалов воздействие тропического климата в экваториальных и субэкваториальных районах. Тропический климат характеризуется повышенной относительной влажностью воздуха, высокой температурой воздуха и большим количеством солнечной радиации на протяжении всего года. Отличительной особенностью тропического климата является крайне высокая коррозионная агрессивность приморской атмосферы, на порядок превышающая коррозионную агрессивность приморской атмосферы регионов РФ (табл. 2). Эксплуатация техники в тропических регионах затруднена из-за влияния высокой температуры и влажности воздуха, коррозии металлов и сплавов под воздействием морских аэрозолей, повреждений электронных компонентов микроорганизмами-биодеструкторами и климатического старения полимерных материалов.

По данным работы [55] установлено (табл. 3), что тропический морской климат во Вьетнаме, Колумбии, Венесуэле, Индии значительно усиливает коррозию рабочих лопаток первой ступени турбины вертолетных двигателей по сравнению с эксплуатацией в РФ или в странах с тропическим континентальным климатом.

Приведенные примеры показывают, что доминирующее влияние на коррозионную агрессивность приморской атмосферы оказывают микроклиматические условия и эксплуатационные факторы. Достоверная оценка коррозионной агрессивности приморской атмосферы в представительных климатических регионах может быть улучшена при учете влияния сезонной неэквивалентности, химических, биологических и других специфических значимых факторов воздействия.

Таблица 2

## Сравнение коррозионной агрессивности атмосферы в РФ, Вьетнаме, Кубе, Венесуэле и Индии

Характеристики внешней среды	Значения характеристик в различных регионах				
	РФ (г. Геленджик)	Вьетнам (г. Нячанг)	Куба (г. Гавана)	Венесуэла (г. Ла Воз)	Индия (г. Шрихарикота)
Средняя температура, °С	15	27,5	26,1	27	27,5
Относительная влажность, %	74	82	81	82	74
Концентрация хлоридов в атмосфере, мг/м <sup>3</sup> в сут	35	30–60	104	568	5000
Показатель коррозионной агрессивности (по ISO 9223)	C2	C3	C4–C5	CX	CX

Таблица 3

## Коррозия рабочих лопаток первой ступени турбины вертолетных двигателей

Деталь или узел двигателя типа ТВ3-117	Количество деталей, подлежащих ремонту из-за коррозии при наработке 500–2000 ч в различных регионах, %		
	РФ, средняя полоса, Сибирь – в течение 10–20 лет	Тропический сухопугный климат – в течение 5–10 лет (Китай, Индия)	Тропический морской климат – в течение 2–6 лет (Вьетнам, Колумбия, Венесуэла, Индия)
Направляющие аппараты 5–7 ступеней	0–20	20–40	70–100
Направляющие аппараты 8–11 ступеней	10–20	20–40	80–100
Спрямяющий аппарат	10	10–20	70–90
Топливный коллектор	0–10	10–30	70–90
Сопловая лопатка 1 ступени	0–10	0–50	80–100
Рабочая лопатка 1 ступени	0–10	0–50	80–100
Сопловой аппарат 4 ступени	10–40	0–20	80–100

Таблица 4

## Количество хлоридов на поверхности образцов из деформируемых алюминиевых сплавов в сопоставлении с размером коррозионных очагов после 1 года испытаний

Сплав	Процент поражения поверхности (числитель) и максимальный размер коррозионных очагов, мм (знаменатель)		Количество осажденных хлоридов на поверхности образца, мг/(м <sup>2</sup> ·сут)	
	без облива	с обливом (5 г/л)	без облива	с обливом (5 г/л)
1424	30/2	30/2	1,4	5,1
В-1469	95/2	90/6	9,8	17,2
В-1461	97/4	98/5	4,5	17,2
1441	97/4	97/4+РСК (3–4 балл)	1,9	8,7
В-1341	20/1,5	55/3	1,4	3,2
1370	30/2	96/3	3,8	16,2
1913	25/1,5	95/3	1,4	4,8
В96ЦЗп.ч.	95/3	97/4	2,9	9,7

## Коррозия алюминиевых сплавов и деталей ГТД

Анализ четырехлетних натурно-ускоренных испытаний восьми перспективных алюминиевых сплавов под навесом в условиях умеренно теплого климата ГЦКИ ВИАМ с нанесением раствора морской соли представлен в работе [56]. Исследованы листы из деформируемых алюминиевых сплавов, указанных в табл. 4. Установлено, что площадь коррозионных поражений при испытаниях с обливом для всех сплавов, кроме 1424 и В-1341, уже после 3 мес испытаний составила

90–95% с образованием плотного слоя продуктов коррозии. После 1 года натурно-ускоренных испытаний было определено количество осажденных хлоридов на поверхности образцов из алюминиевых сплавов (табл. 4) в сопоставлении с максимальным размером коррозионных очагов и процентом поражения поверхности. При испытаниях с обливом количество хлоридов на поверхности в 2–4 раза больше по сравнению с образцами без облива. Увеличение размеров коррозионных поражений способствует большему удержанию хлоридов на поверхности образца.

Четырехлетние испытания показали, что алюминиевые сплавы склонны к питтинговой коррозии, которая может достигать значительной глубины и являться концентратором напряжений при приложении нагрузки к образцу. При оценке этого типа коррозии важное значение имеет не только глубина питтинга, но и объемный фактор, а также процент пораженной поверхности образца. Среди исследованных сплавов наименьшие значения глубины питтинга выявлены на сплаве 1424-T1, средние значения для сплава В-1341-T1 с локальным характером, для остальных сплавов наблюдаются значительные поражения поверхности при глубине ~200–400 мкм. В отличие от скорости коррозии и глубины межкристаллитной коррозии (МКК), для всех сплавов наблюдается рост глубины питтинга в течение всего периода испытаний (рис. 1). Скорость роста питтинга сокращается с увеличением продолжительности испытаний.

При испытаниях без облива характерна зависимость от метеопараметров атмосферы, аналогичная скорости коррозии, которая нивелируется при испытаниях с обливом, – рост питтинга более равномерный. В период испытаний с 3 до 6 мес, характеризующийся наименьшей продолжительностью увлажнения и количеством выпадающих хлоридов, роста питтинга практически не происходит.

По результатам натурно-ускоренных испытаний выявлены параметры, обладающие чувствительностью к коррозии: скорость коррозии, глубина и характер МКК, глубина питтинговой коррозии, площадь коррозионных поражений и максимальный диаметр коррозионного очага. Предложен метод расчета интегрального коррозионного коэффициента, представляющего собой суперпозицию наиболее значимых параметров коррозионной стойкости по семибалльной шкале. Примененный подход перспективен для сравнительной оценки стойкости алюминиевых сплавов к воздействию внешней среды и расчетов припуска на коррозию при проектировании конструкций летательных аппаратов.

В работе [57] систематизирована информация о длительной эксплуатации газотурбинных двигателей типа Д-30, Д-30КУ/КП, ПС-90А и др. Во многих случаях замена деталей двигателей происходила не из-за выработки циклического ресурса, а по причине коррозионных повреждений. Особенно остро стоит проблема коррозионных повреждений деталей проточной части двигателя, в первую очередь лопаток. Характерными видами коррозии являются высокотемпературное окисление, сульфидно-оксидная коррозия, фреттинг-коррозия.

Состояние внешних деталей двигателя в значительной степени зависит от воздействия климатических факторов. В условиях тропического морского климата выявлена коррозия стальных

кронштейнов, трубопроводов и других деталей наружной обвязки двигателя (рис. 2).

Отмечено, что исследования коррозии газотурбинных двигателей носят в основном качественный характер и сводятся к разработке конкретных мероприятий по замене материала и защитных покрытий. Актуальной задачей является математическое моделирование ресурса деталей газотурбинных двигателей, учитывающее вероятность и уровни коррозионных повреждений в заданных условиях эксплуатации.

В работе [55] исследована коррозионная стойкость жаропрочных никелевых сплавов 3-го и 4-го поколений (типа ЖС/ВКНА/ВЖМ), предназначенных для изготовления сопловых и рабочих лопаток турбины перспективных газотурбинных двигателей. Источниками коррозионно-активных веществ в проточной части турбины являются: топливо, содержащее примеси S, Na, V; пыль, захватываемая при взлете и посадке, с элементами Na, K, Mg, Pb, Al, S, C; морская вода, попадающая вместе с воздухом или в виде аэрозолей, содержащая Na, K, S, Cl, Mg.

Соли, оксиды данных веществ и их смеси, расплавляясь и возгоняясь при различных температурах, взаимодействуют с химическими элементами жаропрочных никелевых сплавов не только в газовой или твердой фазе по механизмам высокотемпературной и низкотемпературной горячей коррозии, но и по механизму электролитической горячей коррозии. Активная коррозия протекает как при кратковременных максимальных рабочих температурах, так и при продолжительном действии более низких температур – в интервале 750–850°C. Из исследованных сплавов наиболее высокую коррозионную стойкость показали сплавы ВЖМ5У и ЖС32. При разработке новых сплавов задача повышения их жаропрочности и жаростойкости должна решаться вместе с обеспечением коррозионной стойкости.

#### **Моделирование и прогнозирование климатической стойкости ПКМ**

Перспективный подход к прогнозированию свойств ПКМ при экспонировании в природных климатических условиях, изложенный в работе [58], основан на определении значимых климатических факторов, влияющих на исследуемые показатели, по результатам прямых измерений.

Например, при экспонировании в ГЦКИ ВИАМ конструктивно-подобного элемента мотогондолы авиадвигателя, изготовленного из стеклопластика ВПС-33 (рис. 3), экспериментально установлено, что влагосодержание элементов панели сильно флуктуирует из-за погодных условий (уровень флуктуаций достигает 55%). При моделировании влагосодержания использована мультилинейная зависимость изменения массы  $M$  от климатических факторов в виде

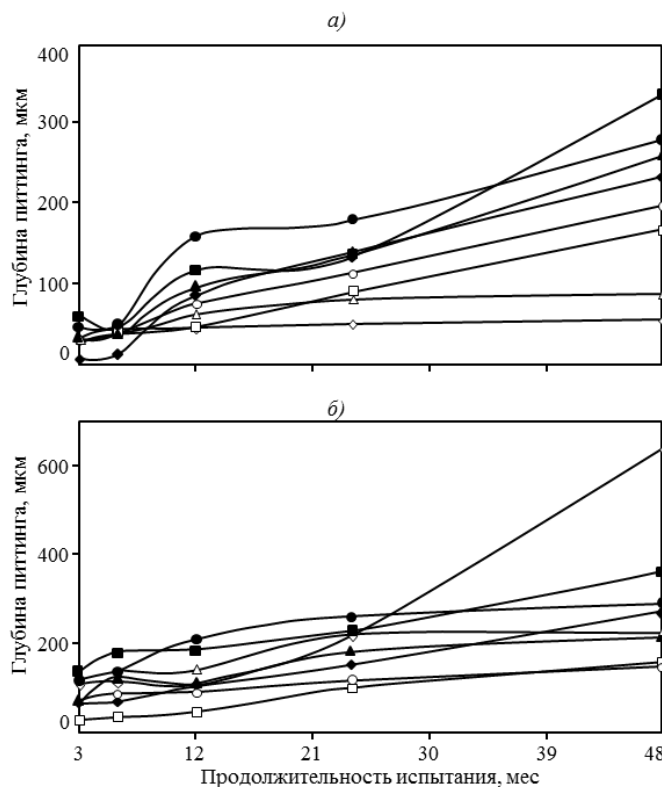


Рис. 1. Глубина питтинга на образцах из алюминиевых сплавов в процессе натурно-ускоренных испытаний без облива (а) и с обливом раствором морской соли (б):  
 □ – 1424; Δ – В-1461; ○ – В-1341; ● – 1913; ▲ – В-1469; ◇ – 1441; ◆ – 1370; ■ – В96ЦЗп.ч.

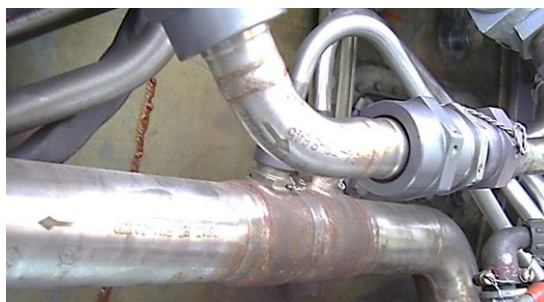


Рис. 2. Коррозионное повреждение трубопровода из сталей 12Х18Н9Т (труба, ниппель) и ЭП678У-ВД (штуцер)

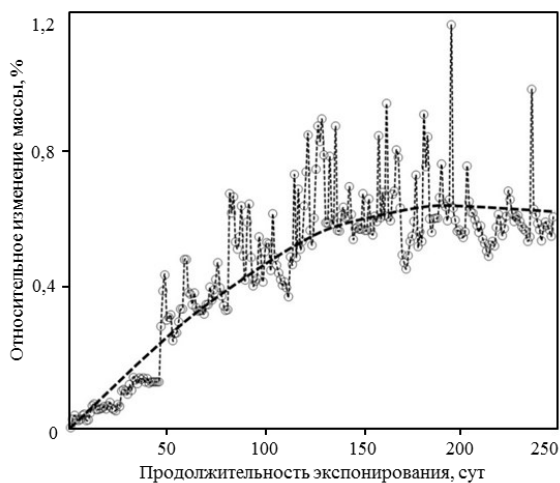


Рис. 3. Флуктуации влагосодержания конструктивно-подобного элемента мотогондолы авиадвигателя из стеклопластика ВПС-33 при экспонировании в ГЦКИ ВИАМ

$$Z=B_0+B_t t+B_T T+B_\varphi \varphi+B_V V+B_\lambda \lambda+B_W W+B_S S, \quad (4)$$

где  $t$  – время от начала экспонирования;  $T$  – среднесуточная температура воздуха;  $\varphi$  – среднесуточная относительная влажность воздуха;  $V$  – среднесуточная скорость ветра;  $\lambda$  – преобладающее суточное направление ветра;  $W$  – среднее за сутки количество осадков;  $S$  – среднесуточная интенсивность солнечной радиации;  $B_i$  ( $i=0, t, T, \varphi, V, \lambda, W, S$ ) – варьируемые параметры модели.

На рис. 4 и 5 показано сравнение измеренных и прогнозируемых значений влагонасыщения по модели (4) элемента мотогондолы из стеклопластика ВПС-33.

Различие между измеренными и прогнозируемыми значениями влагонасыщения не превышает 15–20% (с коэффициентами детерминации  $D^2=0,8$  для аппроксимации и  $D^2=0,8$  при прогнозе), что показывает возможность достоверного прогнозирования влагосодержания в элементах мотогондолы авиадвигателя при экспонировании их в натуральных климатических условиях.

При изучении влияния продолжительности натурального экспонирования на механические свойства ПКМ необходим учет обратимого влияния сорбированной влаги. В табл. 5 показано влияние сушки и увлажнения при 60°C образцов из стеклопластика на основе ткани ТР-0,56 и связующего ЭСФ-2ТА после 3 лет экспонирования в ГЦКИ ВИАМ в ангаре и под навесом.

Видно, что из-за старения стеклопластика под навесом его прочность при изгибе уменьшается на 45%, модуль упругости при изгибе – на 24%. Снижение механических показателей обусловлено необратимыми изменениями (деструкцией связующего в поверхностном слое) и обратимыми изменениями (пластификацией влагой, сорбированной при экспонировании). После высушивания и исключения пластифицирующего воздействия из-за необратимых изменений прочность стеклопластика при изгибе уменьшается на 14%, модуль упругости при изгибе – на 4%. В результате климатического старения под навесом в течение 3 лет снижение механических показателей при предельном влагонасыщении составляет 50% для предела прочности при изгибе и 21% для модуля упругости.

Для исследования закономерностей климатического старения ПКМ перспективно исследование показателей влагопереноса: коэффициента предельного влагосодержания и коэффициента диффузии влаги. Получены новые сведения [59], доказывающие, что из-за деструкции эпоксидной матрицы в поверхностном слое ПКМ коэффициент диффузии существенно возрастает уже на начальных этапах натурной экспозиции. Обоснована модель прогнозирования показателей рельефа поверхности, обеспечивающая погрешность прогнозирования толщины деструктированного поверхностного слоя на уровне 4–6 мкм.

### Биоповреждения и биостойкость

Ущерб от коррозии и старения возрастает из-за биологического поражения материалов в самых разнообразных условиях эксплуатации (атмосфера, гидросфера, литосфера, космическое пространство). Во многих случаях доминирующей причиной разрушений является биокоррозия. Актуальны исследования видового состава микроорганизмов-биодеструкторов, поражающих материалы в различных климатических зонах: выделение новых штаммов и пополнение коллекций тест-культур активными микроорганизмами. Ведется разработка новых количественных критериев биологической повреждаемости.

При формировании стратегии развития национальной сети климатических центров и станций учтена потребность различных отраслей промышленности в расширении испытаний материалов на биологическую стойкость [60, 61]. Ведется работа над созданием новых и расширением действующих микробиологических площадок в различных климатических зонах. В рамках созданной в 2015 году совместной лаборатории исследований биоповреждений МГУ и ВИАМ испытания авиационных материалов стали возможны на Звенигородской и Беломорской биологических станциях. При испытаниях в лабораторных и природных условиях расширяется поиск новых экологически чистых биоцидных добавок и способов защиты металлических, неметаллических материалов и нефтепродуктов от воздействия биовредителей.

Примером микробного разнообразия в биообрастаниях, поражающих различные материалы, является список родов домена *Bacteria*, включающих углеводород-окисляющие микроорганизмы, который рассмотрен в работе [62]: *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Actinomyces*, *Aeromonas*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Beneckea*, *Brevibacterium*, *Corynebacterium*, *Cycloclasticus*, *Cytophaga*, *Dietzia*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Geobacillus*, *Gordonia*, *Klebsiella*, *Lactobacillus*, *Leucothrix*, *Micrococcus*, *Moraxella*, *Mycobacterium*, *Myxobacterium*, *Nocardia*, *Ochrobacter*, *Peptococcus*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Sarcina*, *Serratia*, *Sphaerotilus*, *Spirillum*, *Vibrio*, *Xanthomonas*. Типичный вид биообрастаний на поверхности защитного смазочного материала показан на рис. 6.

Полный жизненный цикл современного материала включает следующие стадии: создание, эксплуатация в конструкции и утилизация [60]. Для большинства материалов именно стадия утилизации является актуальной проблемой. Академиком РАН А.А. Берлиным показано [63], что повышенная активность микроорганизмов-биодеструкторов является основой перспективных методов утилизации материалов с использованием технологий биодеструкции. Рассмотрены три направления создания биоразлагаемых материалов: химический или микробиологический синтез (поли-3-гидроксibuтират); получение смесей полимеров, в которых один из компонентов явля-



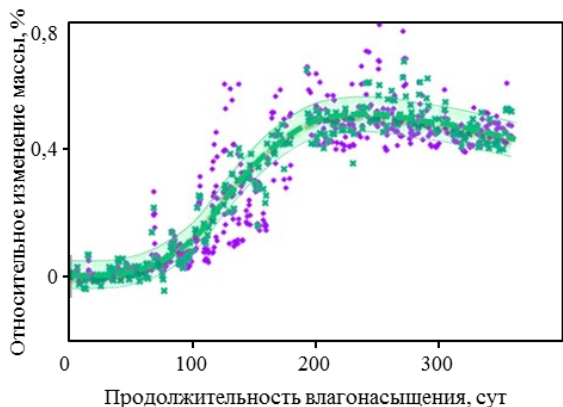


Рис. 4. Сравнение измеренных (♦) и смоделированных (×) на стадии аппроксимации по модели (4) значений влагонасыщения элемента мотогондолы из стеклопластика ВПС-33

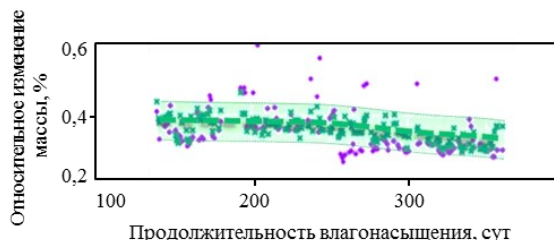


Рис. 5. Сравнение измеренных (♦) и прогнозируемых (×) значений влагонасыщения по модели (4) элемента мотогондолы из стеклопластика ВПС-33

Предел прочности и модуль упругости при изгибе (ГОСТ 4648–2014) образцов из стеклопластика после 3 лет экспонирования в ГЦКИ ВИАМ

Таблица 5

Место испытаний	Состояние материала	Изменение массы образцов при высушивании или увлажнении, %	Предел прочности при изгибе, МПа	Модуль упругости при изгибе, ГПа
Ангар	Без кондиционирования	0	445	21,6
	После сушки при 60°C	-0,14	457 (+2,7%)	20,8 (-3,7%)
	После влагонасыщения	+0,80	290 (-35%)	18,8 (-13%)
Навес	Без кондиционирования	0	246	16,5
	После сушки 60°C	-0,30	391 (+59%)	20 (+21%)
	После влагонасыщения	+0,76	231 (-6%)	16,5 (0)

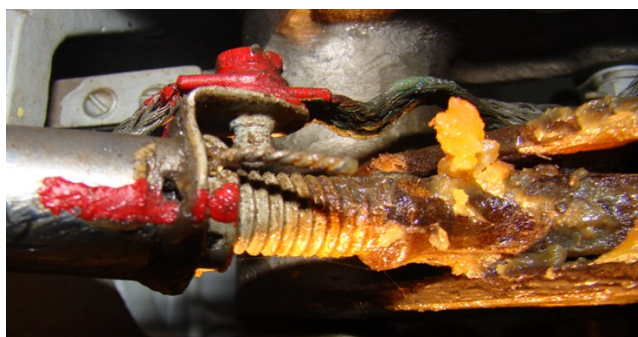


Рис. 6. Биообрастание защитного смазочного материала

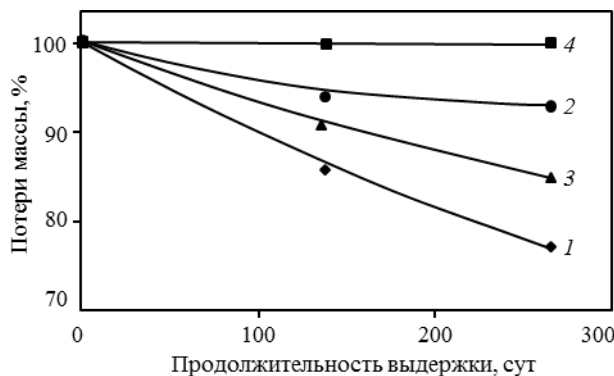


Рис. 7. Кривые потери массы пленок двойных (полилактид–целлюлоза) и тройных (полилактид–целлюлоза–полиэтиленгликоль) смесей после выдерживания в почве:  
 1 – ПЛА–целлюлоза–ПЭГ<sub>600</sub> (60:30:10% по массе); 2 – ПЛА–целлюлоза–ПЭГ<sub>1000</sub> (60:30:10% по массе); 3 – ПЛА–целлюлоза–ПЭГ<sub>4000</sub> (60:30:10% по массе); 4 – ПЛА–целлюлоза (60:40 и 70:30% по массе)

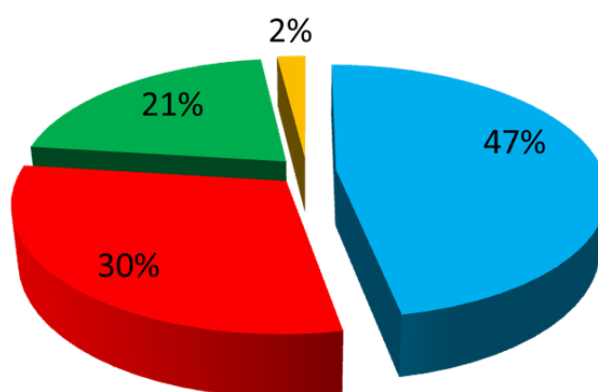


Рис. 8. Классификация основных повреждений самолетов семейства Ту:  
 ■ – повреждения неметаллических материалов; ■ – коррозионные повреждения; ■ – механические повреждения; ■ – усталостные повреждения

ется биоразлагаемым (полилактид, хитозан); введение в макромолекулы фрагментов (полисахариды), которые разлагаются под действием микроорганизмов. Под действием солнечного света происходит фотодеструкция биокомпонентов системы, приводящая к образованию радикалов, которые активируют фотоокислительные процессы в материале и способствуют появлению микротрещин и последующему фрагментарному разрушению. Вследствие этого происходит увеличение поверхности материала, что существенно облегчает дальнейшее протекание окислительных процессов. Последующее разрушение материала происходит под действием микроорганизмов и сопровождается значительным падением его прочности. В результате воздействия свободных радикалов и различных микроорганизмов образующиеся фрагменты синтетических полимеров вовлекаются в гидrolитические и окислительно-восстановительные процессы, приводящие к снижению молекулярной массы. Олигомеры с молекулярной массой от 5000 и менее могут усваиваться некоторыми микроорганизмами с выделением  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . На рис. 7 показано, что введение в полимерные пленки полиэтиленгликоля (ПЭГ) приводит к увеличению их биоразлагаемости.

#### Покрyтия и системы для защиты от коррозии и старения

По данным работы [64] почти половину выявляемых при эксплуатации и ремонтах дефектов силовой конструкции самолетов семейства Ту составляют коррозионные повреждения (рис. 8).

Анализ эксплуатации всего парка самолетов семейства Ту выявил следующие главные причины возникновения коррозии: конструктивные недоработки, производственные отклонения от требований конструкторской документации, нарушения требований по уходу за конструкцией в процессе эксплуатации. В работе рассмотрены основные мероприятия по обеспечению защиты от коррозионных повреждений при проектирова-

нии новейших разработок, которые учитывают многолетний опыт эксплуатации самолетов семейства Ту. Отмечен ряд разработок ВИАМ, сыгравших положительную роль в повышении коррозионной стойкости самолетов Ту. К их числу относятся: эпоксикаучуковая грунтовка ЭП-0215, в 10 раз превышающая по водостойкости ранее применяемую грунтовку ФЛ-086; токопроводящие пасты АЛКМ-1 и ВП-1 с цинковым порошком, позволившие решить проблему защиты мест, зачищенных под металлизацию; паста ВИП-А для торможения развития коррозии на деталях из алюминиевых сплавов; профилактические ингибирующие составы.

Самолеты семейства Ту нового поколения проектируются во всеклиматическом варианте с безремонтной формой эксплуатации, проектным календарным сроком службы 30–40 лет и ресурсом 60 000 летных часов. Предусматривается следующий комплекс конструктивных и технологических мер по обеспечению их коррозионной стойкости:

- применение в конструкции материалов с улучшенными противокоррозионными свойствами – сплавы В950.ч.-Т2, 1163-РДТВ;
- использование стрингеров, гнутых из листового лакированного материала;
- организованный слив конденсата из части фюзеляжа, расположенной под полом в комбинации со съемной конструкцией теплозвукоизоляции;
- использование высокоресурсного герметичного крепежа с гарантированным радиальным натягом (клепка заклепками марок УЗ, ЗУК, ЗУКм, болты с натягом до 1,2%);
- защита с помощью ЛКП зенкованной части отверстий под крепеж;
- герметичная сборка всех стыковых соединений, герметизация зазоров и щелей на внешней поверхности планера и герметизация соединений «стрингер–обшивка» в нижней части фюзеляжа;
- усиленная система защитных покрытий внутри самолета;
- обработка наиболее коррозионно-опасных

мест конструкции с помощью профилактического ингибирующего состава;

– окраска внешней поверхности самолетов системой ЛКП на основе атмосферостойких эмалей, например эмалью марки ВЭ-69 на основе фторполимеров разработки ВИАМ.

Очевидно, что предусмотренные мероприятия нуждаются в существенном увеличении испытаний на эксплуатационную стойкость.

Помимо физико-механических свойств полимерных покрытий под действием климатических факторов происходит изменение и декоративных характеристик, которое свидетельствует о протекании процессов дегазации. В работе [65] исследовались колориметрические характеристики защитно-декоративных полимерных покрытий на основе эпоксидных связующих, экспонированных в условиях умеренного климата (г. Саранск). Для описания полученных экспериментальных данных использовалась экспоненциальная зависимость изменения полного цветового различия покрытия  $\Delta E$ , в виде

$$\Delta E_t = \Delta E_{\max} [1 - \exp(-\alpha \cdot X^\beta)], \quad (5)$$

где  $\Delta E_{\max}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты уравнения, зависящие от состава исследуемого материала;  $X$  – временной или энергетический фактор воздействия (продолжительность экспонирования, дозы суммарной солнечной радиации или ее ультрафиолетовой составляющей).

Показано, что доминирующим фактором влияния внешней среды на изменение цветового различия эпоксидного покрытия является доза ультрафиолетовой составляющей солнечной радиации. Энергетический критерий старения обладает преимуществом перед временным критерием, так как учитывает сезонную и суточную неэквивалентность и позволяет аппроксимировать изменения цветовых показателей покрытий, экспонированных в различных климатических зонах, единой экспоненциальной зависимостью.

В работе [66] исследованы защитные свойства покрытий на основе эпоксидной и полиэфирной смол от климатического старения древесины семи пород в рамках выполнения гранта РФФИ №13-08-12097. Защита образцов древесины слоем эпоксидной смолы ЭД-20 с различными отвердителями и биоцидной добавкой в исходном состоянии увеличивает на 80% коэффициент диффузии влаги, но снижает на 40–50% предельное влагонасыщение. Метод динамической механической спектроскопии позволил решить проблему выбора показателей свойств неоднородного состава «древесина–покрытие». Установлено, что достоверным показателем является температура стеклования защитных покрытий, зависящая от химического строения полимерной основы и состава отвердителей и модификаторов. В процессе натурной экспозиции температуры стеклования

исследованных покрытий возрастают с 40 до 65°C и воспроизводятся с точностью до 2°C.

Пример управляемого химического синтеза аморфных наноструктурированных керамических неорганических материалов для получения толстополеночных полифункциональных покрытий на основе дендритных надмолекулярных гелепрекурсоров полиалюмосиликатов и равномерно распределенных в них мономерных порошков-прекурсоров состава  $ZrO_2-Al_2O_3$  размером 20–40 нм представлен в работе [67]. С использованием лакокрасочных технологий сформированы аморфные слоистые покрытия, имеющие высокую электрическую прочность ( $U=4200$  В при толщине 150 мкм), стабильные при температурах до 1300°C при различных физических нагрузках. Требуется исследования стойкости этих покрытий в реальных условиях эксплуатации.

Для повышения сопротивления высокотемпературной газовой коррозии лопаток компрессора газотурбинного двигателя разработана методика электролитно-плазменного полирования пера лопаток, ионно-имплантационного модифицирования поверхности и нанесения покрытия на поверхность лопаток в едином вакуумном цикле [68]. Достигнуто снижение шероховатости поверхности лопаток с покрытиями до 0,6 мкм. Испытания лопаток с покрытием СДП-1+ВСДП-20, нанесенным по вновь разработанной технологии, показали более высокое сопротивление коррозии по сравнению с базовым вариантом.

#### **Климатическая стойкость строительных материалов и объектов инфраструктуры**

Особенности воздействия экстремально низких климатических температур на элементы сложных технических систем рассмотрены в работе [69]. Выделены следующие причины, влияющие на работу магистральных газопроводов: создание напряжений в конструкции, связанных с механическим перемещением, провисанием, перекручиванием конструкции из-за изменения рельефа поверхности при протаивании и размывке грунтов; создание сложнодеформированного состояния конструкции, вызываемого перемещением грунтов при изменении температур; внешняя и внутренняя коррозия. По совместной программе с ГЦКИ ВИАМ выполняются испытания базальтопластовой арматуры с учетом синергизма воздействия климатических факторов и механических нагрузок. Испытания проводятся в двух климатических зонах – г. Якутск и г. Геленджик.

В работе [70] на примерах инфраструктуры гидроэлектростанций и массивных сооружений показано разрушение бетона из-за щелочной коррозии при взаимодействии щелочей бетона с реакционноспособными заполнителями, содержащими аморфные разновидности диоксида кремния. Установлено, что состав заполнителей существенно влияет на характер и степень коррозии

бетонов. Эффективность мероприятий по защите от щелочной коррозии определяется на основе измерений деформативности контрольных образцов.

Председатель СО РАН, академик А.А. Асеев представил обзор о разработках ведущих институтов СО РАН: нанотехнологий для упрочнения материалов, повышения износостойкости, коррозионной стойкости агрегатов, создания принципиально новых типов материалов для радио- и теплопоглощающих нанопокровов, устройств на основе оптоэлектроники и др. [71]. Указанные направления включают климатические испытания материалов и изделий, для этого открыта новая климатическая станция НИС «Остров Самойловский», введенная в эксплуатацию в сентябре 2013 г. Ведутся исследования климата, состояния тундры и береговой линии, вечной мерзлоты и парниковых газов. Обращено внимание на необходимость более широкого привлечения институтов СО РАН к фундаментальным и прикладным исследованиям коррозии, старения и биостойкости материалов.

### Заключение

Анализ информации, представленной участниками конференции, позволяет определить следующие актуальные направления климатических

испытаний материалов на ближайший период:

- развитие испытаний на климатическую стойкость материалов и сложных технических систем в сочетании с воздействием факторов эксплуатации;
- прогнозирование, оценка срока службы и ресурса материалов;
- защита материалов от старения, коррозии и биоповреждений;
- повышение надежности прогноза коррозии, старения и биоповреждений при объединении лабораторных и натурных методов климатических испытаний;
- проведение климатической квалификации для обеспечения требований Авиационных правил по безопасности;
- развитие инфраструктуры морских испытаний;
- расширение климатических испытаний в тропических регионах;
- развитие методов исследований, чувствительных к ранним стадиям коррозии, старения и биоповреждений;
- исследование агрессивности атмосферы в типовых климатических зонах РФ;
- актуализация нормативной документации в интересах обеспечения эффективности средств и методов защиты от коррозии, старения и биоповреждений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жирнов А.Д., Стрекалов П.В., Каримова С.А., Жиликов В.П., Тарараева Т.И., Мищенко Е.Н. Сезонная динамика процесса коррозии металлов на береговой зоне Черного моря //Коррозия: материалы, защита. 2007. №8. С. 23–30.
2. Corvo F. et al. Outdoor-indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres //Corros. Sci. 2008. V. 50. №1. P. 220–230.
3. Watanabe M., Higashi Y., Tanaka T. Differences between corrosion products formed on copper exposed in Tokyo in summer and winter //Corros. Sci. 2003. V. 45. №7. P. 1439–1453.
4. Odnevall Wallinder I., Leygraf C. Seasonal variations in corrosion rate and runoff rate of copper roofs in an urban and a rural atmospheric environment //Corros. Sci. 2001. V. 43. №12. P. 2379–2396.
5. El Din A.M.S., El-Dahshan M.E., El Din A.M.T. Bio-film formation on stainless steels. Part 2. The role of seasonal changes, seawater composition and surface roughness //Desalination. 2003. V. 154. №3. P. 267–276.
6. Puxbaum H., Gregori M. Seasonal and annual deposition rates of sulphur, nitrogen and chloride species to an oak forest in north-eastern Austria //Atmos. Environ. 1998. V. 32. №20. P. 3557–3568.
7. 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.
8. Morcillo M. et al. Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site //Corros. Sci. 2000. V. 42. №1. P. 91–104.
9. Meira G.R. et al. Salinity of marine aerosols in a Brazilian coastal area – Influence of wind regime //Atmos. Environ. 2007. V. 41. №38. P. 8431–8441.
10. Медведев И.М., Старцев О.В. Исследование сезонной неэквивалентности коррозионной агрессивности атмосферы с использованием микромеханических свойств стали Ст3 //Коррозия: материалы, защита. 2014. №5. С. 1–4.
11. Islam M.A., Farhat Z.N. The synergistic effect between erosion and corrosion of API pipeline in CO<sub>2</sub> and saline medium //Tribol. Int. Elsevier. 2012. P. 1–9.
12. Rajahram S.S., Harvey T.J., Wood R.J.K. Evaluation of a semi-empirical model in predicting erosion–corrosion //Wear. 2009. V. 267. №11. P. 1883–1893.
13. Kermanidis A.T., Petyiannis P.V., Pantelakis S.G. Fatigue and damage tolerance behaviour of corroded 2024 T351 aircraft aluminum alloy //Theor. Appl. Fract. Mech. 2005. V. 43. №1. P. 121–132.
14. Menan F., Hénaff G. Synergistic action of fatigue and corrosion during crack growth in the 2024 aluminium alloy //Procedia Eng. Elsevier. 2010. V. 2. №1. P. 1441–1450.
15. Zhou R. et al. Irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic alloys in supercritical water //J. Nucl. Mater. Elsevier B.V. 2009. V. 395. №1–3. P. 11–22.

16. Brissonneau L. New considerations on the kinetics of mass transfer in sodium fast reactors: An attempt to consider irradiation effects and low temperature corrosion // *J. Nucl. Mater. Elsevier B.V.* 2012. V. 423. №1–3. P. 67–78.
17. Mahmoud M.G. et al. Influence of ultraviolet light irradiation on corrosion behavior of weathering steel with and without TiO<sub>2</sub>-coating in 3 mass. % NaCl solution // *Scr. Mater.* 2005. V. 53. №11. P. 1303–1308.
18. Tang C.H., Cheng F.T., Man H.C. Laser surface alloying of a marine propeller bronze using aluminium powder // *Surf. Coatings Technol.* 2006. V. 200. №8. P. 2594–2601.
19. Луценко А.Н., Гриневич А.В., Каримова С.А. Прочностные характеристики материалов планера самолетов в условиях влажности // *Вопросы материаловедения.* 2013. Т. 1. №73. С. 212.
20. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Долговечность изделий и коррозионная усталость конструкционных материалов // *Вопросы материаловедения.* 2013. Т. 1. №73. С. 220.
21. Laurino A. et al. Effect of corrosion on the fatigue life and fracture mechanisms of 6101 aluminum alloy wires for car manufacturing applications // *Mater. Des. Elsevier Ltd.* 2014. V. 53. P. 236–249.
22. Liao M., Renaud G., Bellinger N. Fatigue modeling for aircraft structures containing natural exfoliation corrosion // *Int. J. Fatigue.* 2007. V. 29. №4. P. 677–686.
23. Burns J.T., Kim S., Gangloff R.P. Effect of corrosion severity on fatigue evolution in Al–Zn–Mg–Cu // *Corros. Sci. Elsevier Ltd.* 2010. V. 52. №2. P. 498–508.
24. Wasekar N.P., Jyothirmayi A., Sundararajan G. Influence of prior corrosion on the high cycle fatigue behavior of microarc oxidation coated 6061-T6 Aluminum alloy // *J. Fatigue. Elsevier Ltd.* 2011. V. 33. №9. P. 1268–1276.
25. Chlistovsky R., Heffernan P., Duquesnay D. Corrosion-fatigue behaviour of 7075-T651 aluminum alloy subjected to periodic overloads // *J. Fatigue.* 2007. V. 29. №9–11. P. 1941–1949.
26. Jones K., Hoepfner D.W. Prior corrosion and fatigue of 2024-T3 aluminum alloy // *Corros. Sci.* 2006. V. 48. №10. P. 3109–3122.
27. Li X.-D. et al. Effect of prior corrosion state on the fatigue small cracking behaviour of 6151-T6 aluminum alloy // *Corros. Sci. Elsevier Ltd.* 2012. V. 55. P. 26–33.
28. Jones K. et al. Effect of prior corrosion on short crack behavior in 2024-T3 aluminum alloy // *Corros. Sci.* 2008. V. 50. №9. P. 2588–2595.
29. Masaki K., Ochi Y., Matsumura T. Small crack property of austenitic stainless steel with artificial corrosion pit in long life regime of fatigue // *J. Fatigue.* 2006. V. 28. №11. P. 1603–1610.
30. Weng L. et al. Corrosion fatigue crack growth of AISI 4340 steel // *J. Fatigue. Elsevier Ltd.* 2013. V. 48. P. 156–164.
31. Sheng-Li L. et al. Influence of exposure to aggressive environment on fatigue behavior of a shot peened high strength aluminum alloy // *Mater. Sci. Eng. A.* 2013. V. 574. P. 243–252.
32. Okayasu M. et al. Effects of atmospheric corrosion on fatigue properties of a medium carbon steel // *J. Mater. Sci.* 2008. V. 44. №1. P. 306–315.
33. Sil D., Chakrabarti S. Photocatalytic degradation of PVC–ZnO composite film under tropical sunlight and artificial UV radiation: A comparative study // *Sol. Energy. Elsevier Ltd.* 2010. V. 84. №3. P. 476–485.
34. Woo R. et al. Environmental degradation of epoxy-organoclay nanocomposites due to UV exposure: Part II residual mechanical properties // *Compos. Sci. Technol.* 2008. V. 68. №9. P. 2149–2155.
35. Woo R.S.C. et al. Environmental degradation of epoxy-organoclay nanocomposites due to UV exposure. Part I: Photo-degradation // *Compos. Sci. Technol.* 2007. V. 67. №15–16. P. 3448–3456.
36. Berketis K., Tzetzis D., Hogg P.J. The influence of long term water immersion ageing on impact damage behaviour and residual compression strength of glass fibre reinforced polymer (GFRP) // *Mater. Des.* 2008. V. 29. №7. P. 1300–1310.
37. Parker B.M. The strength of bonded carbon fibre composite joints exposed to high humidity // *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 1990. V. 1. №3. P. 187–191.
38. Srubar W.V., Billington S.L. A micromechanical model for moisture-induced deterioration in fully biorenewable wood–plastic composites // *Compos. Part A. Appl. Sci. Manuf. Elsevier Ltd.* 2013. V. 50. P. 81–92.
39. Van den Oever M.J., Beck B., Müssig J. Agrofibre reinforced poly(lactic acid) composites: Effect of moisture on degradation and mechanical properties // *Compos. Part A. Appl. Sci. Manuf. Elsevier Ltd.* 2010. V. 41. №11. P. 1628–1635.
40. Thoppul S.D., Finegan J., Gibson R.F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – A review // *Compos. Sci. Technol. Elsevier Ltd.* 2009. V. 69. №3–4. P. 301–329.
41. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов.* 2010. №11. С. 19–27.
42. Singh A., Singh R. Effect of Mechanical Loading and Environmental Degradation on Carbon Fibre Reinforced Composites // *SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics.* 2006. P. 11–19.
43. Nakamura T., Singh R.P., Vaddadi P. Effects of Environmental Degradation on Flexural Failure Strength of Fiber Reinforced Composites // *Exp. Mech.* 2006. V. 46. №2. P. 257–268.
44. Azuma Y. et al. Outdoor and accelerated weathering tests for polypropylene and polypropylene/talc composites: A comparative study of their weathering behavior // *Polym. Degrad. Stab. Elsevier Ltd.* 2009. V. 94. №12. P. 2267–2274.
45. Zhao W., Singh R.P., Korach C.S. Effects of environmental degradation on near-fiber nanomechanical properties of carbon fiber epoxy composites

- //Compos. Part A. Appl. Sci. Manuf. Elsevier Ltd. 2009. V. 40. №5. P. 675–678.
46. Parvatareddy H. et al. Environmental aging of high-performance polymeric composites: Effects on durability //Compos. Sci. Technol. 1995. V. 53. №4. P. 399–409.
  47. Revuelta D. et al. A new approach to fatigue analysis in composites based on residual strength degradation //Compos. Struct. 2000. V. 48. №1–3. P. 183–186.
  48. Nofar M., Hoa S.V., Pugh M.D. Failure detection and monitoring in polymer matrix composites subjected to static and dynamic loads using carbon nanotube networks //Compos. Sci. Technol. Elsevier Ltd. 2009. V. 69. №10. P. 1599–1606.
  49. Berkets K., Tzetzis D. The compression-after-impact strength of woven and non-crimp fabric reinforced composites subjected to long-term water immersion ageing //J. Mater. Sci. 2010. V. 45. №20. P. 5611–5623.
  50. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
  51. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
  52. Курс М.Г., Каримова С.А., Махсидов В.В. Сравнение коррозионной стойкости деформируемых алюминиевых сплавов по результатам натуральных и натурно-ускоренных испытаний под навесом //Вопросы материаловедения. 2013. Т. 1. №73. С. 182–190.
  53. Старцев О.В., Медведев И.М., Поляков В.В., Беляев И.А. Оценка коррозионных поражений алюминиевого сплава методами фрактального анализа и микротвердости //Коррозия: материалы, защита. 2014. №6. С. 43–48.
  54. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С., Медведев И.М., Фролов А.С. Коррозия и старение поверхности конструкционных материалов по данным 3D микроскопии //Труды ВИАМ. 2014. №12. Ст. 12 (viam-works.ru).
  55. Грандильевская И.Г., Тихомирова Е.А., Рыбников А.И., Шеляпина Н.М. К вопросу о выборе материала для рабочих и сопловых лопаток турбины перспективного ГТД на основании критерия коррозионной стойкости /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
  56. Курс М.Г. Обобщенный коэффициент коррозионной стойкости деформируемых алюминиевых сплавов /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
  57. Бояршинов М.В. Актуальные вопросы по развитию методологии оценки ресурса деталей ГТД с учетом коррозионных повреждений, вызванных эксплуатационными и климатическими факторами /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
  58. Старцев В.О., Панин С.В., Гринев М.А. Контроль и прогнозирование влагосодержания конструктивно-подобных элементов мотогондолы авиадвигателя в натуральных климатических условиях /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
  59. Панин С.В. Исследование рельефа поверхности и влагопереноса в ПКМ, подвергнутых климатическому старению /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
  60. Способ термомеханической обработки титановых сплавов: пат. 2369662 Рос. Федерация; опубл. 28.11.2007.
  61. 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.
  62. Брюханов А.Л. Исследование микробного разнообразия в биообрастаниях, поражающих различные материалы /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
  63. Берлин А.А. Биоразлагаемые полимерные материалы /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
  64. Межнев Д.А., Афанасьева Н.С., Миркин И.И., Брондз Л.Д. Разработка методов и средств противокоррозионной защиты воздушных судов ПАО «Туполев» на основе системы мониторинга и анализа коррозионных повреждений планера в эксплуатации и при ремонте /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
  65. Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р., Артамонов Д.А. Климатическая стойкость композиционных строительных материалов в натуральных условиях эксплуатации /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения мате-

- риалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
66. Махоньков А.Ю. Влияние защитных покрытий на свойства древесины при экспонировании в натуральных климатических условиях /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
67. Туев В.И., Люкшин Б.А., Иванов А.А. Керамические антикоррозийные покрытия на основе наполненных алюмосиликатов /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
68. Дыбленко Ю.М., Смыслов А.М., Таминдаров Д.Р., Живушкин А.А. Повышение сопротивления высокотемпературной газовой коррозии лопаток компрессора путем комбинированного модифицирования их поверхности /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
69. Лебедев М.П. Особенности воздействия экстремально низких климатических температур на элементы сложных технических систем /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
70. Зюзина О.В., Костыря Г.З., Коних Г.С. Исследования по оценке процесса развития щелочной коррозии бетона при применении потенциально реакционноспособных заполнителей Дальневосточного и Северо-Кавказского регионов /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
71. Асеев А.Л. Наноструктурированные материалы для специальных применений: результаты работ институтов Сибирского отделения РАН /В сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).