

УДК 620.193.21

В.В. Антипов<sup>1</sup>, М.Г. Курс<sup>1</sup>, Р.И. Гирш<sup>1</sup>, Н.Ю. Серебrenникова<sup>1</sup>

## НАТУРНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТИПА СИАЛ В МОРСКОМ КЛИМАТЕ

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-56-64

*Представлены основные подходы к проведению климатических испытаний металлополимерных композиционных материалов типа СИАЛ с учетом особенностей многослойного строения материала при использовании образцов с искусственным непроклеем, обеспечивающим непосредственный контакт с коррозионной средой приморской зоны. Приведены результаты комплексной оценки климатической стойкости материала СИАЛ-3-1, состоящего из тонких листов Al-Li-сплава и слоев стеклопластика, при испытаниях с регламентированными повреждениями в виде непроклея, в деформированном состоянии при приложении изгибающей нагрузки с оценкой сохраняемости свойств при испытаниях на МЦУ, а также результаты оценки влагопоглощения слоями стеклопластика в гибридном материале.*

**Ключевые слова:** коррозия, старение, металлополимерные композиционные материалы, СИАЛ, натурные климатические испытания.

V.V. Antipov<sup>1</sup>, M.G. Kurs<sup>1</sup>, R.I. Girsh<sup>1</sup>, N.Yu. Serebrennikova<sup>1</sup>

## CLIMATIC FIELD TESTS OF SIAL TYPE METAL-POLYMER COMPOSITION MATERIALS IN MARINE CLIMATE

*The article presents key approaches to the performance of the climatic tests of SIAL type metal polymer composite materials. The characteristic features of a multi-layer structure of the material were taken into account during the use of the samples with artificial starved spots which provide direct contact with the aggressive atmosphere of the coastal zone. There are given the results of a comprehensive assessment of the climatic resistance of the SIAL-3-1 material consisting of thin sheets of Al-Li alloy and fiberglass layers in tests with regulated damages in the form of a starved spots, in the deformed state when a bending load is applied alongside with an assessment of the persistence of properties when tested for the low-cycle fatigue, as well as the results of the evaluation of moisture absorption by the layers of fiberglass in a hybrid material.*

**Keywords:** corrosion, aging, metal-polymer composite materials, SIAL, full-scale climatic tests.

<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

Металлополимерные композиционные материалы класса СИАЛ являются перспективными конструкционными материалами нового поколения, представляющими собой гибридные листовые клееные композиционные материалы, разработанные в 1990-х годах и предназначенные, прежде всего, для использования в основных элементах летательных аппаратов. Слоистые клееные материалы и конструкции широко применены в широкофюзеляжных самолетах Ил-86, Ил-96 и Ан-124 [1].

Алюмостеклопластик (СИАЛ) представляет собой слоистый материал, состоящий из чередующихся тонких алюминиевых листов (50–70% по объему) толщиной 0,3–0,5 мм из конструктивных сплавов и прослоек стеклопластика с клеевым препрегом (толщиной 0,3–0,5 мм) различной

структуры армирования. Типичная структура таких материалов – пятислойная (3/2): три алюминиевых листа и две прослойки пластика с несколькими монослоями препрега [2].

Алюмостеклопластики отличаются сочетанием пониженной плотности и высоких значений трещиностойкости, прочности, пожаростойкости и ударостойкости [3–5]. Однако помимо определения комплекса физико-механических свойств важной также является оценка стойкости материала к воздействию агрессивных факторов внешней среды, что позволяет оценить поведение материала в предполагаемых условиях эксплуатации.

Поскольку материалы класса СИАЛ по своей природе являются гибридными, т. е. состоящими из полимерных и металлических материалов, отдельным вопросом является разработка принципиальных подходов к оценке их климатической

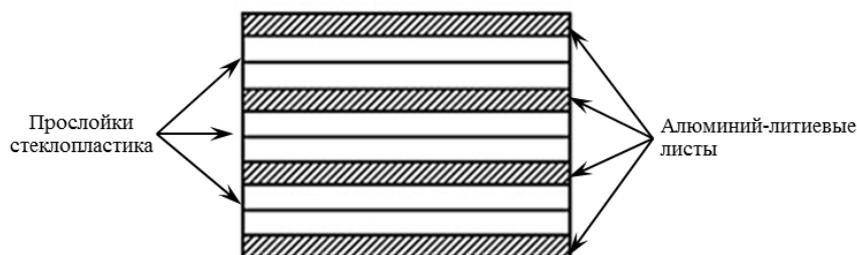


Рис. 1. Схема укладки слоев в материале СИАЛ-3-1

стойкости. С одной стороны, в наибольшей степени влиянию внешних факторов подвергается внешняя обшивка из алюминиевого сплава; с другой стороны, возникновение доступа активной среды к прослойкам из стеклопластика также может оказывать влияние на изменение свойств материала вследствие протекающих процессов влагонасыщения и деструкции стеклопластиковой прослойки.

Одним из важных аспектов проведения климатических испытаний материалов класса СИАЛ является оценка стойкости внешних листов к воздействию внешних факторов, так как они в большей степени подвержены климатическому воздействию. Доступ внешней среды к прослойкам из стеклопластика возможен только в случае повреждения или отсутствия защиты по торцевым поверхностям внешнего алюминиевого листа, а также нарушения герметичности при постановке крепежа.

Данная работа направлена на разработку принципиальных методических подходов к проведению климатических испытаний металлополимерных композиционных материалов (МПКМ) с учетом особенностей их структурного состава и эксплуатационного назначения.

### Материалы и методы

#### Материалы, использованные при проведении исследований

Для проведения испытаний применен МПКМ марки СИАЛ-3-1, изготовленный из листов алюминиевого сплава 1441-T1 толщиной 0,3 мм после анодного оксидирования в хромовой кислоте с нанесенным защитным адгезионным грунтом (рис. 1). Разработанный во ФГУП «ВИАМ» сплав 1441 является наиболее технологичным Al-Li-сплавом при холодной прокатке [1].

### Условия натурных испытаний

Натурные испытания проводили на открытой площадке ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова [6], расположенного на берегу Черного моря. Основные метеорологические и аэрохимические параметры атмосферы ГЦКИ приведены в таблице.

Так, по уровню загрязнения атмосферы хлорид-ионами условия экспозиции ГЦКИ ВИАМ характеризуются высокими значениями:  $S_4$  – по ГОСТ 9.039–74 и  $S_2$  – по ISO 9223; по уровню загрязнения диоксидом серы:  $P_1$  – по ГОСТ 9.039–74,  $P_0$  – по ISO 9223 (фоновые значения). Уровень продолжительности увлажнения в условиях экспозиции ГЦКИ ВИАМ высокий и составляет  $\tau_4$  ( $2500 < \tau \leq 5500$  ч/год) – по ISO 9223.

Условия экспозиции на открытой площадке оказывают наиболее агрессивное воздействие именно на полимерные композиционные материалы вследствие максимального воздействия солнечного нагрева с образованием возможной паровой среды из-за набухания стеклопластиковых прослоек в случае проникновения влаги по торцевым поверхностям.

### Методы испытаний

Следует отметить, что в настоящее время открытым остается вопрос разработки нормативной базы по оценке коррозионной стойкости МПКМ, так как большинство стандартов регламентирует процедуру климатических испытаний только однородных материалов (металлических, полимерных и функциональных), в то время как для материалов сложного состава и структуры необходим индивидуальный методический подход к проведению испытаний.

Отсутствие специализированных гостированных методик, позволяющих проводить комплексную

### Средние многолетние метеорологические и аэрохимические параметры атмосферы ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова

| Температура воздуха, °C |           |           | Относительная влажность воздуха $f$ , % | Продолжительность увлажнения, ч               |  | Скорость ветра, м/с | Осадки         |                      | Скорость осаджения СГ, мг/(м <sup>2</sup> ·сут), по методу |               | Скорость осаджения SO <sub>2</sub> , мг/(м <sup>2</sup> ·сут), по методу сульфатной пластины | Годовая величина суммарной солнечной радиации, МДж/м <sup>2</sup> |
|-------------------------|-----------|-----------|---|---|--|---------------------|----------------|----------------------|--|---------------|--|---|
| $t_{cp}$                | $t_{max}$ | $t_{min}$ |   | при $f \geq 70\%$ и $t \geq -1^\circ\text{C}$ | при $f > 80\%$ и $t > 0^\circ\text{C}$ |                     | количество, мм | продолжительность, ч | сухого полотна   | влажной свечи |  |   |
| 14,8                    | 36,0      | -9,5      | 73                                      | 5289  | 3312                                   | 3,5                 | 691            | 452                  | 42,9   | 65,8          | 3,6  | 5068  |

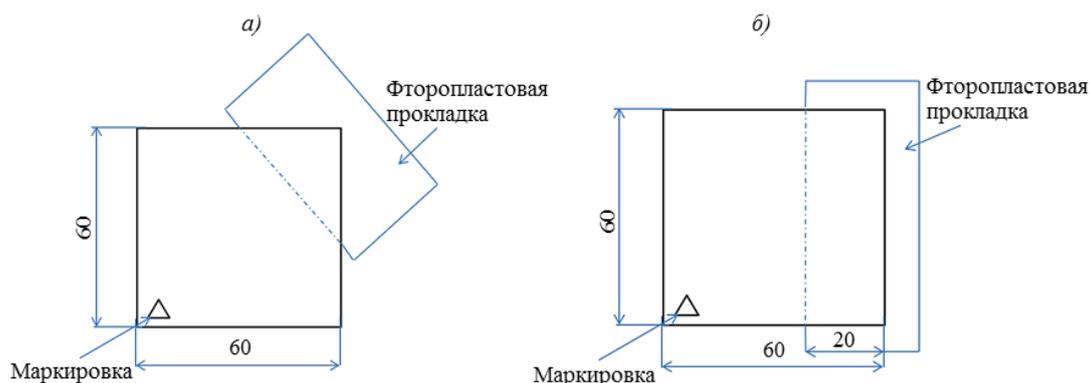


Рис. 2. Образцы из материала СИАЛ-3-1 с угловым непроклеем (а) и с непроклеем по боковой стороне (б)

оценку стойкости к внешним воздействующим факторам материалов авиационного назначения с учетом особенностей их эксплуатации (включая синергетическое воздействие знакопеременных и/или статических нагрузок, перепадов температуры и влажности, солнечного излучения, загрязняющих веществ атмосферы), обуславливает потребность разработки индивидуальных программ комплексных испытаний отдельных групп вновь разрабатываемых материалов, позволяющих с высокой степенью достоверности оценивать и гарантировать сохранение свойств материалов при их применении в перспективных изделиях авиационной техники. Подходы к решению данной задачи нашли отражение в ряде работ ФГУП «ВИАМ», включающих разработку натурно-ускоренных методов испытаний металлических и неметаллических материалов, а также коррозионно-механических испытаний [7–10].

Для проведения комплексной оценки климатической стойкости материала СИАЛ разработаны опытные методики, включающие факторы ускорения процессов коррозии и старения:

- испытания образцов с регламентированным повреждением в виде непроклея;
- натурная экспозиция в условиях одновременного воздействия изгибных нагрузок.

Для исследования подверженности коррозионному разрушению материала при сверлении отверстия под крепеж проведена оценка изменения малоциклового усталости (МЦУ) образцов МПКМ после испытаний в условиях повышенной коррозионной агрессивности.

Ввиду наличия слоистой структуры материала особое внимание при проведении коррозионных испытаний уделено оценке сохранения адгезионной прочности между слоями материала, так как при открытом доступе внешней среды к торцевым поверхностям данный параметр является одним из наиболее существенных, влияющих на прочностные характеристики материала.

При проведении коррозионных испытаний образцов из материала СИАЛ фиксировали следующие параметры: стойкость материала к рас-

слоению, увеличение исходного регламентированного дефекта в виде непроклея, деструкция прослойки из стеклопластика и образование дефектов в виде коррозионных поражений внешних листов из алюминиевого сплава.

Для оценки коррозионной стойкости внешних обшивочных листов из алюминиевого сплава 1441-T1 проведены также длительные климатические испытания с оценкой изменения свойств материала.

#### *Испытания образцов из материала СИАЛ с регламентированным непроклеем*

Для оценки стойкости материала к расслоению при открытом доступе внешней среды к стеклопластиковой прослойке применены два вида образцов – с угловым непроклеем и с непроклеем по боковой стороне, полученных в процессе формования посредством применения фторопластовой прокладки (рис. 2).

Испытания образцов с регламентированным непроклеем проводили при экспозиции на открытой площадке ГЦКИ в течение 1 года и в камере солевого тумана (КСТ).

#### *Натурная экспозиция образцов из материала СИАЛ в условиях одновременного воздействия изгибных нагрузок*

В эксплуатационных условиях листовой материал обшивки фюзеляжа работает на растяжение. Для снижения массы авиационных конструкций рассматривается применение гибридных слоистых материалов взамен алюминиевых сплавов. За рубежом применен слоистый материал GLARE (типа СИАЛ) в растянутых зонах верхней обшивки отсека фюзеляжа самолета А-380 (рис. 3). В структуре материала GLARE использованы листы из традиционного алюминиевого сплава 2024.

В России разработаны МПКМ класса СИАЛ на базе листов из алюминий-литиевого сплава 1441. В данной работе поставлена и решалась задача оценки коррозионной стойкости, расслоения и влагонасыщения слоистого материала класса СИАЛ, а также оценки коррозионной стойкости образцов из материала СИАЛ под напряжением.



Рис. 3. Верхняя обшивка фюзеляжа самолета А-380 из материала GLARE [3]

Защитное покрытие (грунт+эмаль) на поверхности внешнего листа из материала СИАЛ при эксплуатации также подвергается деформациям с напряжениями растяжения в поверхностных слоях. С учетом пониженной пластичности лакокрасочного покрытия (ЛКП) по отношению к алюминий-литиевому сплаву 1441, поставлена задача выявления сквозного трещинообразования ЛКП с возможным коррозионным воздействием на внешний лист из алюминиевого сплава. Для этого проведены сравнительные испытания под напряжением образцов при четырехточечном изгибе для определения стойкости материала к расслоению торцевых поверхностей с защитой и без, а также оценена адгезионная прочность покрытия, нанесенного на материал, при изгибающих напряжениях.

Для проведения испытаний по оценке стойкости защитных покрытий использовали образцы из материала СИАЛ-3-1 размером 20×110 мм с различными видами покрытий:

- 3 образца – в исходном состоянии (без покрытия);
- 3 образца – с покрытием только грунтом, включая торцы, – образцы желтого цвета, покрытые грунтом ЭП-215 (первый слой – горячая сушка (г. с.), второй слой – холодная сушка (х. с.));
- 3 образца – с покрытием «грунт+ЛКП», включая торцы, – два слоя грунта ЭП-215 (г.с., х.с.) + два слоя эмали ВЭ-69 (х.с.);
- 3 образца – с герметизированными торцами (только грунт ЭП-215), сам образец с гальваническим покрытием.

Нагружение образцов проводили по схеме четырехточечного изгиба в струбцинах при нагрузке  $0,5\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_{0,2}=260$  МПа) и стреле прогиба 1,64 мм (рис. 4).

#### Оценка изменения малоциклового усталости образцов из материала СИАЛ

Одной из ключевых тенденций последних лет является увеличение доли применения композици-

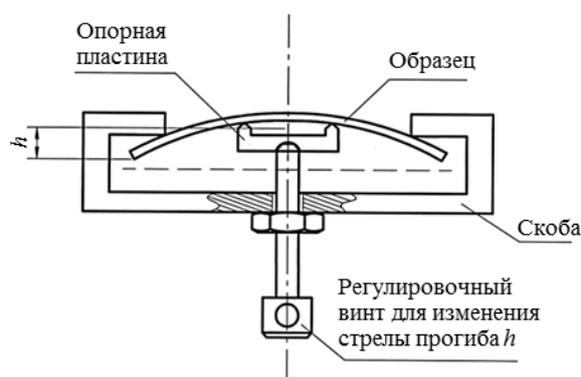


Рис. 4. Схема установки для коррозионных испытаний под напряжением

онных материалов в изделиях авиационной техники, позволяющих значительно снизить массу конструкции без ухудшения летных характеристик [11]. При этом многочисленными отечественными и зарубежными исследованиями показано, что применение полимерных композиционных материалов (в частности, углепластиков) в контакте с металлами, в том числе с алюминиевыми сплавами, вызывает электрохимическую коррозию, наибольшая вероятность возникновения которой появляется при сверлении отверстий под крепеж [12].

Для оценки влияния внешней среды на изменение МЦУ (характеристика выбрана как наиболее чувствительная к воздействию климатических факторов) проведены сравнительные испытания образцов с концентратором в виде открытого отверстия под крепеж. Испытания на МЦУ проводили на высокочастотном пульсаторе Amsler при коэффициенте асимметрии цикла  $R=0,1$  с частотой 73,85 Гц.

#### Испытания образцов из монолитного алюминиевого сплава 1441-T1

Для оценки коррозионной стойкости листов также проведены коррозионные испытания монолитного листового материала из сплава 1441-T1 (лист толщиной 1,6 мм) с использованием стандартных методов исследований стойкости к коррозионному воздействию внешней среды.

#### Исследование влагонасыщения образцов из материала СИАЛ

Проникновение влаги между слоями металла и набухание стеклопластика в материале СИАЛ возможно только через торцы образцов, так как внешние поверхности материала защищены внешними листами из алюминиевого сплава. Поскольку стеклопластик обладает анизотропией, то при моделировании структуры алюмостеклопластика необходимо учитывать направления возможного проникновения влаги, обусловленные структурой стеклопластика с учетом расположения стекловолокон.

Защитные покрытия на торцевые поверхности образцов не наносили с целью ужесточения условий испытаний, что позволило оценить влияние внешней среды на долговечность образцов из материала СИАЛ-3-1 в случае нарушения герметичности защитных покрытий на торцах деталей при сборке и эксплуатации изделий.

Для эксперимента по оценке влагонасыщения материала СИАЛ-3-1 отобрано два вида образцов (60×60 мм) с искусственно созданными дефектами: четыре образца с угловым непрочлеем и четыре образца с боковым непрочлеем, обеспечивающие возможность попадания влаги в слой стеклопластика вдоль и поперек волокон.

Зависимость кинетики сорбции от направления вырезки определяли на образцах без дефектов следующих размеров (первое число соответствует длине вдоль направления прокатки металлического листа): 100×10; 10×100; 100×25 и 25×100 мм. Для сравнения кинетики сорбции слоистых металло-стеклопластиков на основе листов из алюминий-литиевого сплава 1441 с применением разработанного клеевого связующего ВСК-14-2МР с ранее разработанными материалами использовали слоистый металло-стеклопластик СИАЛ-3 на основе алюминиевого сплава Д16ч.-АТ и стеклопластика из клеевого препрега марки КМКС-1.80.Т60.37 на основе клеевого связующего ВСК-14-1.

Перед началом сорбционных испытаний образцы высушивали в эксикаторе над поверхностью прокаленного силикагеля до стабилизации массы при температуре 60°C, затем образцы взвешивали для определения исходной массы и увлажняли при той же температуре над поверхностью воды в эксикаторе с притертой крышкой. Контроль геометрических размеров образцов и их массы проводили ежедневно.

### Результаты и обсуждение

#### Результаты исследований коррозионной стойкости листов из сплава 1441-Т1

Для определения коррозионной стойкости внешних листов из сплава 1441-Т1 проведены

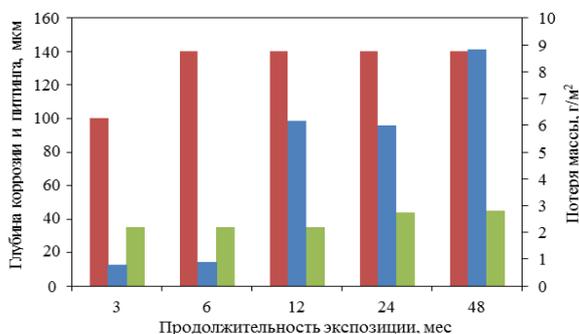


Рис. 5. Потеря массы (■), глубина межкристаллитной (■) и питтинговой (■) коррозии листа из сплава 1441-Т1 после 4 лет натуральных испытаний в ГЦКИ

комплексные коррозионные испытания материала с оценкой склонности сплава к межкристаллитной и питтинговой коррозии, с оценкой потери массы, а также изменения механических свойств.

На рис. 5 приведены результаты оценки потери массы и характеристик локального коррозионного разрушения листа из сплава 1441-Т1 в течение 4 лет натуральных испытаний в условиях умеренно теплого климата ГЦКИ. Видно, что сплав не склонен к питтинговой коррозии – после 4 лет испытаний глубина питтинга не превышает 43 мкм; рост межкристаллитной коррозии прекращается со временем и не превышает 140 мкм.

По результатам определения потерь механических свойств образцов из сплава 1441-Т1 установлено, что потери предела прочности при растяжении не превышают 17% после 4 лет экспозиции, потери предела текучести незначительны, а потери относительного удлинения достигают 36% (рис. 6).

#### Испытания образцов из материала СИАЛ с регламентированным непрочлеем

По результатам визуальной оценки после 1 года экспозиции как на открытой площадке в условиях умеренно теплого климата, так и в камере солевого тумана (КСТ), расслоений по торцам (в том числе в местах регламентированных непрочлеев) как угловых, так и боковых образцов не отмечено. Размеры регламентированных дефектов в виде непрочлея не увеличились, т. е. воздействие климатических факторов не оказало негативного влияния на образование новых расслоений – даже несмотря на то, что торцы образцов не были дополнительно защищены от воздействия внешней среды (рис. 7).

После 1 года коррозионных испытаний выявлены коррозионные поражения внешних листов из алюминиевого сплава, которые носят единичный характер. Для оценки глубины коррозионных поражений проведены металлографические исследования с изготовлением микрошлифа.

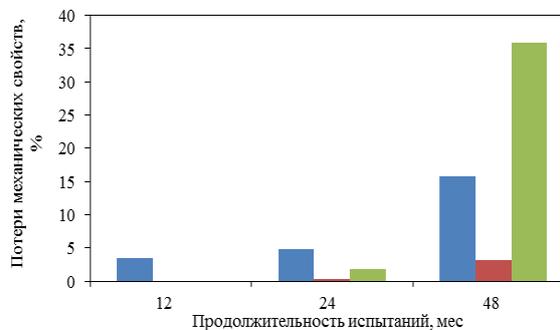


Рис. 6. Потери механических свойств (■ –  $\sigma_{0.2}$ ; ■ –  $\sigma_{в}$ ; ■ –  $\delta$ ) образцов из листа сплава 1441-Т1 после 1, 2 и 4 лет натуральных испытаний в ГЦКИ

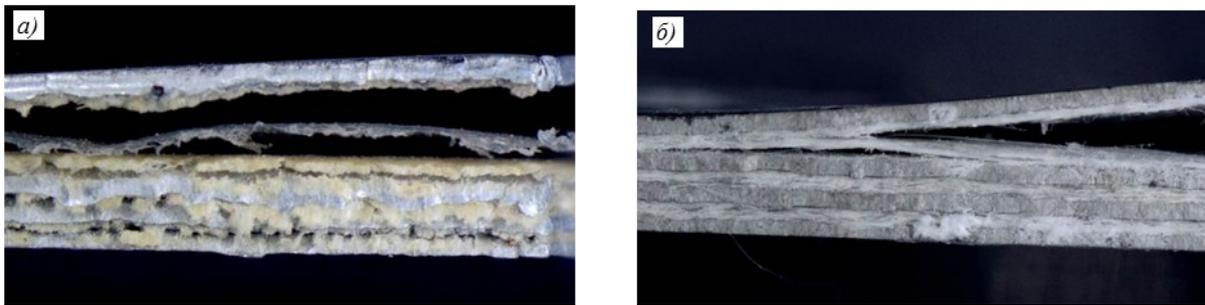


Рис. 7. Макроснимки ( $\times 25$ ) образцов из материала СИАЛ-3-1 размером  $60 \times 60$  мм с угловым непроклеем после 1 года экспозиции на открытой площадке (а) и в камере солевого тумана (б)

По результатам металлографических исследований микрошлифов, изготовленных в местах локальных коррозионных повреждений, выявлено наличие межкристаллитной коррозии сплава 1441-Т1 глубиной не более  $140 \text{ мкм}$  (рис. 8, а–з). Отмечается, что появление питтинговой коррозии глубиной не более  $50 \text{ мкм}$  (рис. 8, д) на поверхности металлических листов возможно в конструкции только при нарушении антикоррозионной защиты – гальванических и лакокрасочных покрытий.

Результаты оценки глубины коррозионных поражений аналогичны значениям показателей, определенных на монолитном листовом материале.

Ключевым аспектом повышенной коррозионной стойкости материалов класса СИАЛ является то, что многослойная структура материала ограничивает распространение коррозии на глубину, превышающую толщину внешнего обшивочного листа, ввиду наличия барьера

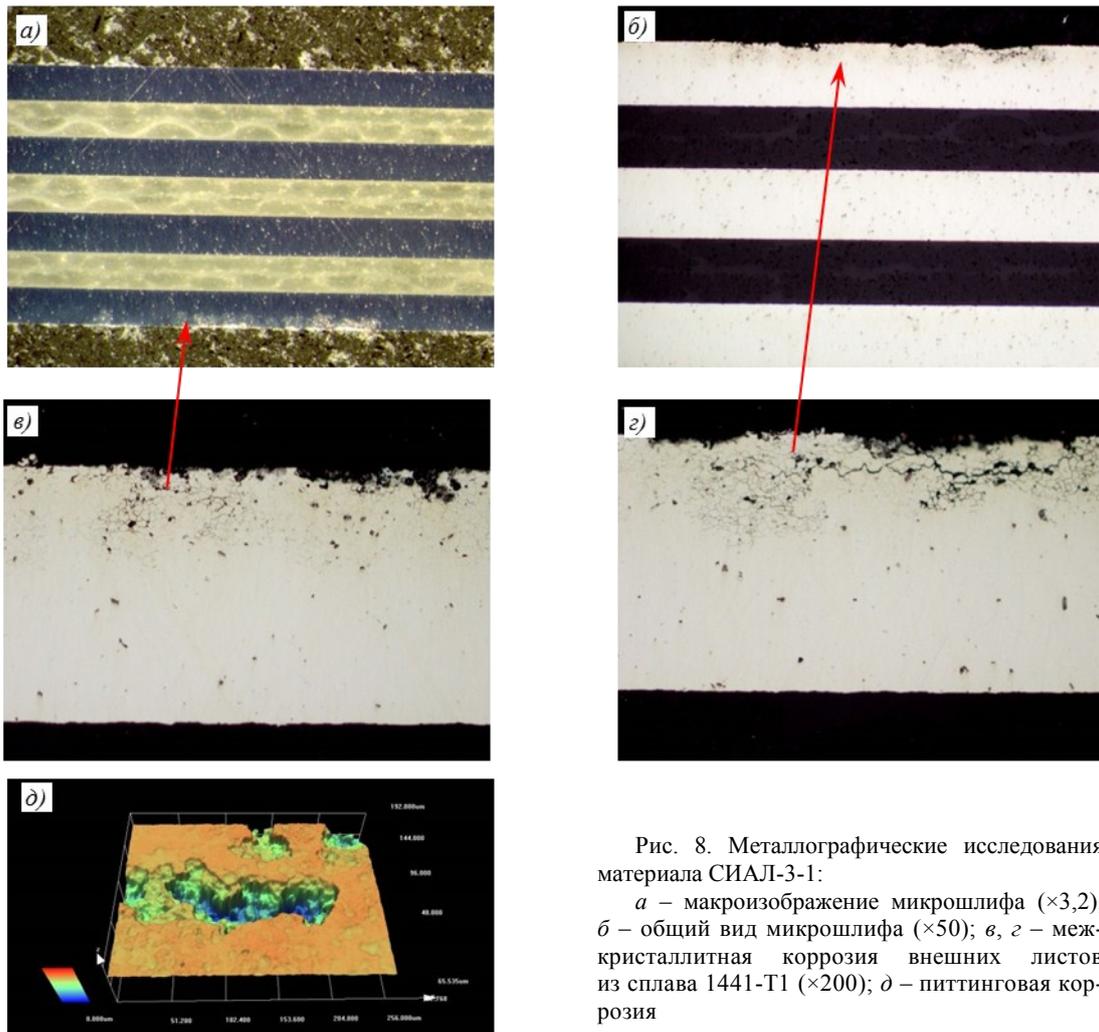


Рис. 8. Металлографические исследования материала СИАЛ-3-1:

а – макроизображение микрошлифа ( $\times 3,2$ ); б – общий вид микрошлифа ( $\times 50$ ); в, з – межкристаллитная коррозия внешних листов из сплава 1441-Т1 ( $\times 200$ ); д – питтинговая коррозия



Рис. 9. Торцы образцов из материала СИАЛ-3-1 при испытаниях на четырехточечный изгиб:  
а – без покрытия; б – с покрытием «грунт+ЛКП»

из стеклопластиковой прослойки. Таким образом, многослойная структура материала СИАЛ позволяет гарантировать сохранение высокого уровня значений прочностных характеристик материала при воздействии агрессивных факторов внешней среды.

#### **Испытания образцов из материала СИАЛ-3-1 с оценкой малоциклового усталости**

По результатам оценки количества циклов до разрушения материала СИАЛ-3-1 при испытаниях на МЦУ образцов после натуральных испытаний на открытой площадке в ГЦКИ в течение 1 года установлено, что сохраняемость свойств составляет 80% по сравнению с исходными значениями показателя. При оценке же данного показателя в отношении листов из сплава 1441-T1 сохраняемость свойств составляет 50% после 1 года экспозиции.

К отличительным особенностям материалов класса СИАЛ, обуславливающим преимущество их применения по сравнению с монолитными листовыми материалами, также относятся повышенные трещиностойкость, вязкость разрушения, жаростойкость и сопротивление ударам [1, 4, 13].

#### **Испытания образцов из материала СИАЛ-3-1 с защитным покрытием на четырехточечный изгиб**

По результатам проведенных исследований после 1 года натурной экспозиции с приложением изгибающей нагрузки выявлено отсутствие каких-либо дефектов (включая трещины, отслоения, сколы и вспучивания покрытия, а также коррозионные повреждения), в том числе расслоений по торцам (рис. 9).

Аналогично результатам металлографических исследований наличие многослойной структуры материала позволяет прогнозировать его высокую стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением, так как в случае возникновения трещин внешнего листа под воздействием нагрузки и коррозионной среды разрушение всего материала по толщине будет затружено.

#### **Исследование влагонасыщения образцов из материала СИАЛ**

##### *Исследования на образцах из алюмокомпозитного материала с искусственно созданным непроклеем*

В процессе испытаний образцов из материала СИАЛ-3-1 установлено, что образцы с боковым дефектом поглощают 0,57% влаги от исходной массы, а образцы с угловым дефектом 0,27%, что подтверждает зависимость влагонасыщения слоев стеклопластика в образцах из материала СИАЛ от укладки стекловолокна в слое стеклопластика и направления попадания влаги по отношению к ориентации волокон.

##### *Исследования на образцах алюмокомпозитных материалов без защиты торцевых поверхностей*

Кинетика прироста массы образцов без дефектов из материалов типа СИАЛ марок СИАЛ-3, СИАЛ-1-4Р, СИАЛ-3-2Р и СИАЛ-3-5Р различных размеров представлена на рис. 10. Для сравнения кинетики сорбции слоистых алюмокомпозитных материалов на основе листов из алюминий-литиевого сплава 1441 с применением разработанного клеевого связующего ВСК-14-2МР [14] с ранее разработанными материалами использован слоистый металлокерамический композит СИАЛ-3 на основе алюминиевого сплава Д16ч.-АТ и стеклопластика из клеевого препрега марки КМКС-1.80.Т60.37 на основе клеевого связующего ВСК-14-1.

Использованы значения относительного изменения массы, приведенные в научно-технической литературе [15, 16]; условия эксперимента, описанные в работе [15], совпадают с условиями испытаний образцов в данной работе.

Показано, что для алюмокомпозитных марок СИАЛ-1-4Р, СИАЛ-3-2Р и СИАЛ-3-5Р на основе клеевого препрега марки КМКС-2МР.120.РВМПН.30 с применением клеевого связующего ВСК-14-2МР характерна менее интенсивная сорбция влаги по сравнению с алюмокомпозитом СИАЛ-3 на основе клеевого препрега КМКС-1.80.Т60.37 с применением клеевого связующего ВСК-14-1. Наиболее сильно данные закономерности проявляются при большой площади кромки по отношению к общей поверхности образца – образцы размером 100×10 и 10×100 мм.

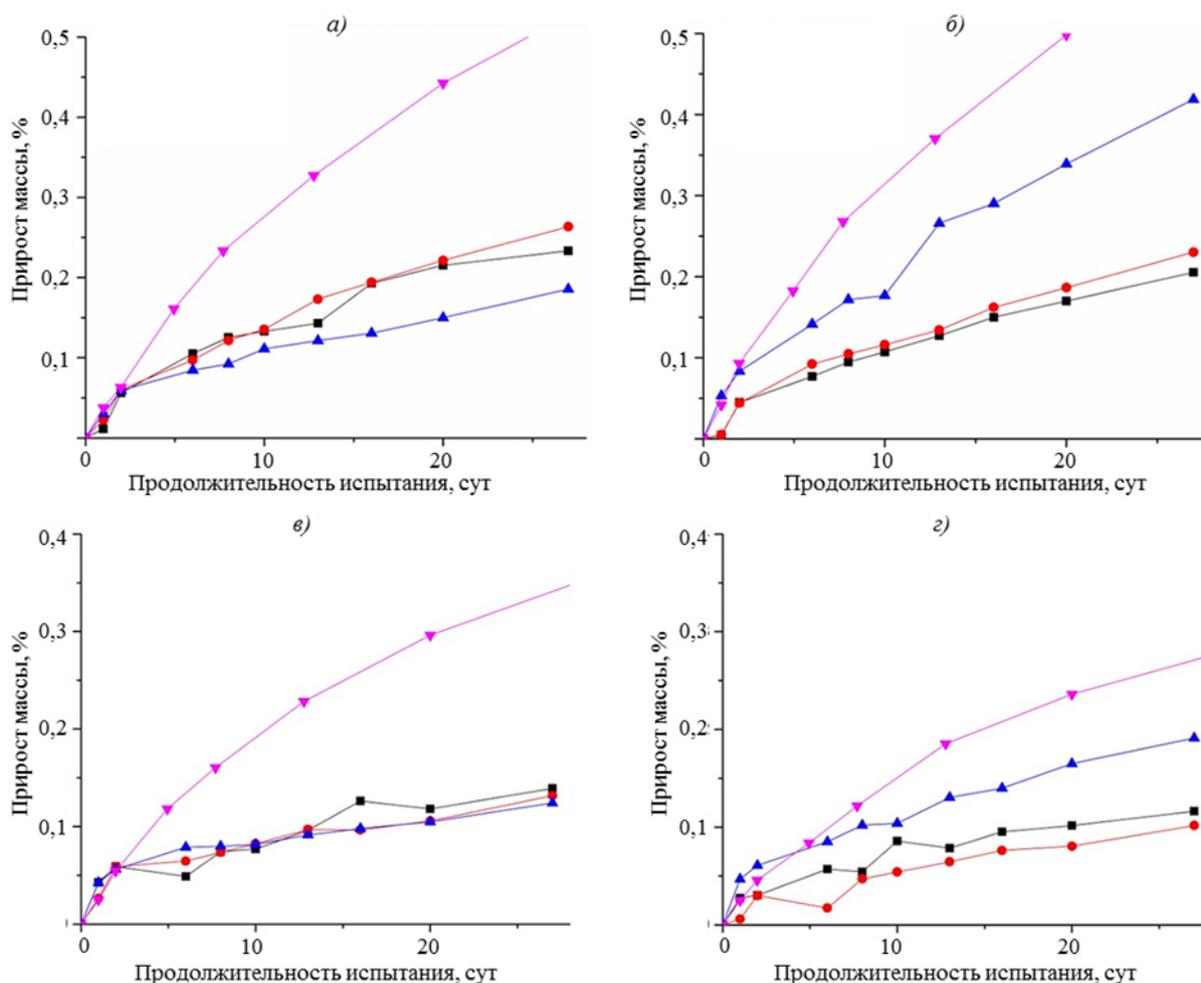


Рис. 10. Кинетика сорбции влаги в образцах размером 100×10 (а); 10×100 (б); 100×25 (в) и 25×100 мм (з) из материалов типа СИАЛ марок: СИАЛ-3-5Р (■), СИАЛ-3-2Р (●), СИАЛ-1-4Р (▲) и СИАЛ-3 (▼)

### Заключения

1. По результатам проведенных комплексных исследований коррозионной стойкости МПКМ марки СИАЛ-3-1 установлено, что данный материал обладает высокой коррозионной стойкостью в условиях агрессивного воздействия климатических факторов внешней среды умеренно теплого климата приморской зоны. Наличие искусственных дефектов в виде непроклея не оказывает влияния на образование расслоений в материале, доступ коррозионной среды не вызывает деструкции прослойки из стеклопластика.

2. Повышенная стойкость материала к коррозионному разрушению обеспечивается его многослойной структурой, которая препятствует развитию коррозионных поражений по сечению образца, ограничиваясь внешними обшивочными листами, что позволяет гарантировать сохранение высокого уровня прочностных характеристик при воздействии агрессивных факторов внешней среды.

3. Результаты оценки изменения характеристики МЦУ после одного года натурной экспози-

ции на открытой площадке показали, что сохраняемость свойств составляет 80% от исходных значений.

4. Наличие радиуса кривизны при испытаниях на четырехточечный изгиб образцов из материала типа СИАЛ с защитным покрытием не вызывает образования расслоений; адгезионная прочность покрытия остается на исходном уровне.

5. По результатам оценки влагонасыщения слоями стеклопластика установлено, что образцы с искусственно созданным боковым непроклеем поглотили 0,57% влаги от исходной массы, а образцы с угловым дефектом 0,27%, что подтверждает зависимость влагонасыщения слоев стеклопластика в образцах из материала СИАЛ от укладки стекловолокна в слое стеклопластика и направления попадания влаги по отношению к ориентации волокон.

6. Результаты оценки влагопоглощения слоев стеклопластика в образцах из слоистых материалов типа СИАЛ при непосредственном контакте

с коррозионной средой показали, что для алюмокомпозитных материалов на основе клеевого препрега с применением клеевого связующего ВСК-14-2МР характерна менее интенсивная сорбция влаги по сравнению с образцами алюмокомпозитного пластика на основе клеевого препрега с применением клеевого связующего ВСК-14-1.

7. Структура гибридных слоистых материалов обеспечивает повышенную коррозионную

стойкость, что позволяет гарантировать сохранение высокого уровня прочностных характеристик при условии надежной антикоррозионной защиты торцевых поверхностей деталей по периметру и отверстий под крепеж. Способом защиты этих поверхностей является нанесение грунтов, эмалей, герметиков по схемам в соответствии с нормативными документами и требованиями конструкторской документации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Антипов В.В., Сидельников В.В., Гриневич А.В., Постнов В.И. Слоистые алюмополимерные материалы СИАЛ // Клеи. Герметики. Технологии. 2007. №5. С. 15–17.
2. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В. Слоистые металлополимерные композиционные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 226–230.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитных материалов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 174–184.
4. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В., Попов В.И., Ершов А.С. Высокопрочные, трещиностойкие, легкие алюмокомпозитные материалы СИАЛ – перспективные материалы для авиационных конструкций // Технология легких сплавов. 2009. №2. С. 29–31.
5. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Котова Е.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Куцевич К.Е. Клеевые препреги и композиционные материалы на их основе // Российский химический журнал. 2010. №1. Т. LIV. С. 53–56.
6. 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.
7. Курс М.Г. Прогнозирование прочностных свойств обшивки ЛА из деформируемого алюминиевого сплава В950.ч.-Т2 с применением интегрального коэффициента коррозионного разрушения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №5 (65). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.04.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-101-109.
8. Курс М.Г., Антипов В.В., Луценко А.Н., Кутырев А.Е. Интегральный коэффициент коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3 (42). С. 24–32. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-24-32.
9. Курс М.Г., Николаев Е.В., Абрамов Д.В. Натурно-ускоренные испытания металлических и неметаллических материалов: ключевые факторы и специализированные стенды // Авиационные материалы и технологии. 2019. №1 (54). С. 66–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73.
10. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Гладких А.В., Гончаров А.А., Скиба О.В., Боярских А.В., Подживотов Н.Ю. Испытания крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов на силовом полу ГЦКИ «ВИАМ» им. Г.В. Акимова // Композитный мир. 2014. №1. С. 72–78.
11. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
12. Каблов Е.Н., Каримова С.А., Семенова Л.В. Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком // Коррозия: материалы, защита. 2011. №12. С. 1–7.
13. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Исследование пожаростойкости слоистых гибридных алюмокомпозитных материалов класса СИАЛ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №3. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.07.2019).
14. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Свойства и назначение композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №8. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.07.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-6-6.
15. Старцев О.В., Кротов А.С., Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Антипов В.В., Гращенков Д.В. Сорбция и диффузия влаги в слоистых металлополимерных композиционных материалах типа «СИАЛ» // Материаловедение. 2011. №12. С. 38–44.
16. Антипов В.В., Старцев О.В., Сенаторова О.Г. Закономерности влагопереноса в СИАЛах // Коррозия: материалы, защита. 2012. №3. С. 13–18.