

УДК 620.193

*В.А. Дуюнова¹, А.Е. Кутырев¹, Н.Ю. Серебренникова¹, А.И. Вдовин¹, А.В. Сомов¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА РАЗВИТИЕ КОРРОЗИОННЫХ ПОРАЖЕНИЙ НА ОБРАЗЦАХ СЛОИСТОГО МЕТАЛЛОСТЕКЛОПЛАСТИКА КЛАССА СИАЛ**

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90

Проведены исследования влияния воздействия агрессивных факторов внешней среды при испытаниях в камере солевого тумана и влагонасыщения на прочностные характеристики и малоцикловую усталость заклепочных соединений слоистого металлогластопластиков с системой комплексной защиты и без нее. Показано, что многослойная структура СИАЛ препятствует развитию коррозионных поражений в слоях по толщине материала. Механические свойства образцов из материала СИАЛ трехслойной и пятислойной структуры после влагонасыщения практически не изменяются. Установлено, что отсутствие антикоррозионной защиты слоистого материала приводит к снижению усталостной долговечности заклепочных соединений.

Ключевые слова: слоистый металлогластопластик, СИАЛ, алюмогластопластик, коррозионная стойкость, заклепочные соединения, усталостная долговечность.

*V.A. Dyuunova¹, A.E. Kutyrev¹, N.Yu. Serebrennikova¹, A.I. Vdovin¹, A.V. Somov¹***EXAMINATION OF THE IMPACT OF AGGRESSIVE ENVIRONMENTAL FACTORS ON THE DEVELOPMENT OF CORROSION DAMAGE ON SAMPLES OF LAMINATED GLASS-REINFORCED PLASTIC OF SIAL CLASS**

The article presents the results of examination of the influence of aggressive environmental factors during tests in a salt fog chamber and moisture saturation on the strength characteristics and low-cycle fatigue of riveted joints of laminated glass-reinforced plastic with and without an integrated protection system. It is shown that the multilayer structure of SIAL prevents the development of corrosion damage in layers along the depth of the material. The mechanical properties of samples made of SIAL material with three-layer and five-layer structure after moisture saturation practically do not change. It was found that the lack of corrosion protection of the laminated material leads to a decrease in the fatigue life of riveted joints.

Keywords: laminated glass-reinforced plastic, SIAL, aluminum-glass-reinforced plastic, corrosion resistance, riveted joints, fatigue life.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Слоистые металлогластопластики класса СИАЛ являются перспективными конструкционными материалами нового поколения, представляющими собой листовые металлополимерные материалы, предназначенные для использования в элементах авиационной техники с целью обеспечения требований к надежности материалов и безопасности эксплуатации воздушных судов [1–6].

Алюмостеклопластик (сокращенно СИАЛ – аббревиатура от слов **С**текло **И** **А**люминий) представляет собой слоистый металлополимерный материал, состоящий из двух компонентов с различными физико-механическими свойствами: чередующихся тонких листов (50–70 % по объему) толщиной 0,25–0,5 мм из алюминиевых или алюминий-литиевых сплавов и прослоек стеклопластика толщиной 0,2–0,4 мм на основе клеевых препрегов с применением эпоксидных связующих и стекловолокон.

Алюмостеклопластики отличаются сочетанием пониженной плотности ($d \approx 2350\text{--}2450 \text{ кг/м}^3$) и высоких значений трещиностойкости ($dl/dN \approx 0,2\text{--}0,4 \text{ мм/цикл}$ при $\Delta K = 31 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$), прочности ($\sigma_b > 600 \text{ МПа}$), малоциклового усталости ($N_{cp} \approx 180\text{--}200 \text{ цикл}$), огнестойкости и ударостойкости [3–5]. Уровень прочностных характеристик зависит от схемы укладки и количества монослоев, а также от вида стеклонаполнителя.

Результаты проведенных исследований отечественных материалов СИАЛ и зарубежных аналогов GLARE [7–11] показали, что применение слоистых металлополимерных материалов для изготовления особо ответственных деталей летательных аппаратов – например, обшивок панелей крыла и фюзеляжа, гермошпангоута, пола кабины пилота, дублеров в зонах проемов – обеспечит снижение массы деталей самолета, повышение прочности, трещиностойкости и усталостной долговечности конструкции.

Однако помимо определения комплекса физико-механических свойств важной также является оценка стойкости материала к воздействию агрессивных факторов внешней среды, что позволяет прогнозировать поведение слоистого материала в предполагаемых условиях эксплуатации.

Специфика слоистой структуры у материалов СИАЛ, наличие нескольких поверхностей раздела, влагонасыщение полимерных слоев определяют взаимодействие слоистых металлопластиков с внешней средой и обуславливают потенциальную опасность развития коррозионных поражений на образцах СИАЛ. Процессы, приводящие к снижению механических свойств при растяжении и усталостной долговечности слоистых материалов при воздействии агрессивных факторов внешней среды, можно разделить на следующие группы:

- коррозия внешних поверхностей из алюминиевых или алюминий-литиевых листов;
- нарушение адгезионных связей между металлическими и полимерными слоями;
- проникновение в материал влаги через полимерные слои и деструкция прослоек стеклопластика;
- коррозия на границе раздела «металл–стеклопластик».

Одним из важных аспектов проведения коррозионных испытаний образцов из материала СИАЛ является оценка стойкости внешних металлических листов к воздействию агрессивных факторов внешней среды. С одной стороны, в наибольшей степени влиянию агрессивных факторов подвергаются внешние металлические поверхности, с другой – доступ активной среды к прослойкам из стеклопластика также может оказывать влияние на изменение свойств материала вследствие протекающих процессов влагонасыщения и деструкции прослоек стеклопластика [12–19].

Доступ внешней среды к стеклопластику возможен только в случае повреждения или отсутствия защиты торцевых поверхностей или нарушения герметичности при постановке крепежа. Подавляющее число деталей авиационных конструкций подвергается сборке с помощью клепок. Применение герметиков, грунтовок и других функциональных материалов в конструктивных элементах из алюмостеклопластиков позволяет обеспечить плотное прилегание заклепок, образующих герметичный шов, и снизить вероятность деградации свойств материала в креплениях, а также вследствие

этого сократить межремонтные сроки и увеличить срок эксплуатации изделий авиационной техники.

Цель данной работы – исследование влияния воздействия агрессивных факторов внешней среды при испытаниях в камере солевого тумана, имитирующих воздействие тропического климата, включая морской туман, на прочностные характеристики и малоцикловую усталость заклепочных соединений слоистого металлостеклопластика с системой комплексной защиты и без нее с учетом особенностей слоистой структуры СИАЛ и эксплуатационного назначения деталей из данного материала.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 6.2. «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [20].

Материалы и методы

Испытания проводили на образцах из слоистого металлостеклопластика марки СИАЛ-3-1 двух структур – трехслойной (2/1) и пятислойной (3/2) (рис. 1). Внешние поверхности материала СИАЛ образованы листами из алюминий-литиевого сплава 1441 толщиной 0,35 мм после анодного оксидирования и нанесения защитного адгезионного грунта и прослоек стеклопластика толщиной 0,22 мм, каждая из которых сформирована с применением двух монослоев клевого препрега на ткани марки КМКС-2м.120.Т60.37.

Испытания проводили на образцах СИАЛ с системой комплексной защиты, состоящей из грунтовки ЭП-0215 и эмали ВЭ-69, и без нее.

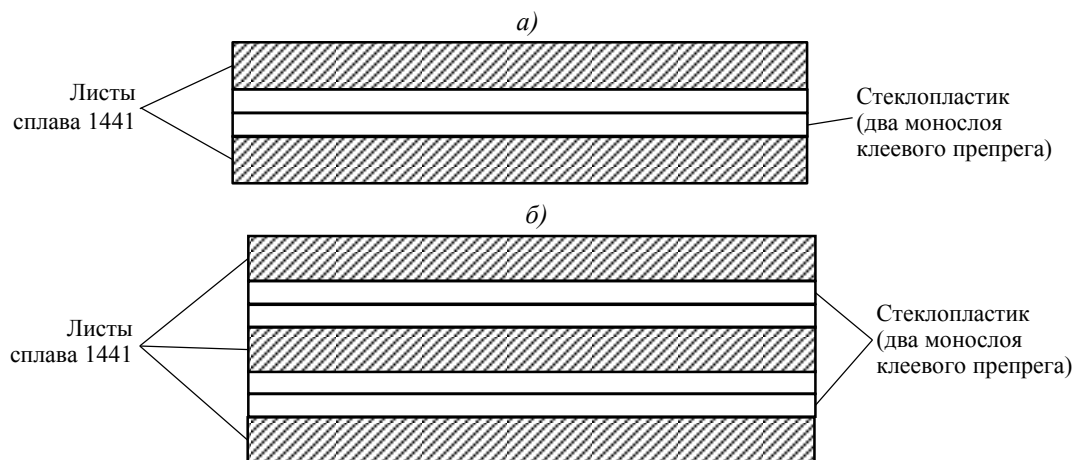


Рис. 1. Трехслойная (а) и пятислойная (б) структуры алюмостеклопластика

Исследование влияния солевого тумана на развитие коррозионных поражений проводили на образцах размером 50×50 мм из материала СИАЛ в камере солевого тумана ASCOTT CC1000iP (фирма Ascott Analytical, Великобритания) при температуре 35 °С с распылением 5 %-ного раствора хлорида натрия в течение 336 и 720 ч в соответствии с ГОСТ 9.913–90.

Малоцикловую усталость конструктивно-подобных образцов заклепочных соединений слоистого металлостеклопластика на основе сплава 1441 (с системой комплексной защиты и без нее) при воздействии агрессивных факторов внешней среды при испытаниях в камере солевого тумана определяли при осевой нагрузке в соответствии с ГОСТ 25.502–79 и ММ 1.2.002–2001 при комнатной температуре на

образцах, изготовленных по ОСТ 1 00872–77 (рис. 2). Параметры нагружения: коэффициент асимметрии цикла $R = 0,1$, частота нагружения $f = 5$ Гц, величина нагрузки 12,35 и 9,50 кН для образцов из пяти- и трехслойного материала СИАЛ соответственно.

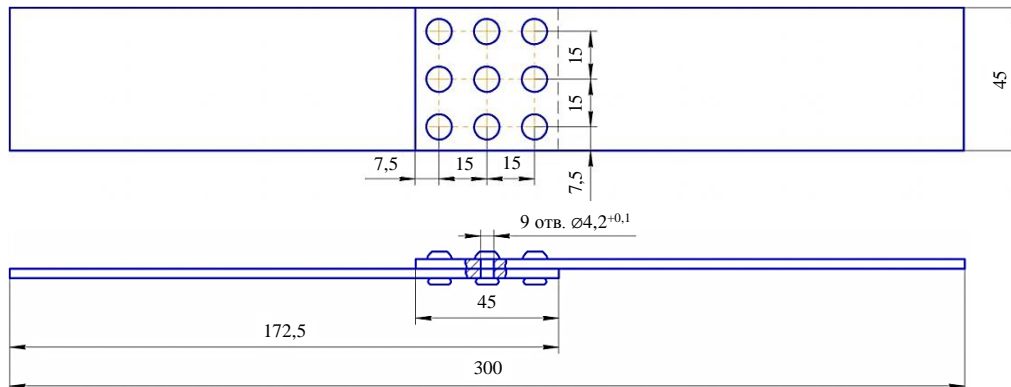


Рис. 2. Образец заклепочного соединения (трехрядное соединение внахлест) для испытаний на малоцикловую усталость

Механические свойства при растяжении определяли на образцах размером 25×240 мм с помощью универсальной электромеханической машины Zwick/Roell Z100 (фирма Zwick/ Roell, Германия) в соответствии с ГОСТ 11701–84.

Исследование микроструктуры алюмокомпозитов и оценку качества поверхности отверстий для установки заклепок проводили с помощью оптического микроскопа Olympus GX51 в соответствии с МР 21-31–85.

Оценку глубины питтингов проводили на конфокальном микроскопе Plu Neox (фирма Sensofar-Tech S.L., Испания) согласно ГОСТ 9.908–85.

Выбор уровней влагонасыщения образцов из материала СИАЛ проводили по результатам исследования кинетики массы образцов при испытаниях в климатической камере Climats Excal (фирма Climats, Франция) с учетом наибольшего роста массы образцов в начальный период испытаний. Проводили измерение массы образцов длиной 100 мм и шириной от 10 до 50 мм, вырезанных в продольном и поперечном направлениях.

Для исследования обратимого и необратимого влияния влаги на механические характеристики при растяжении слоистого металлокерамического материала на основе сплава 1441, образцы для механических испытаний (лопатки размером 25×240 мм) и образцы-свидетели в виде прямоугольных пластин размером 100×10 мм, изготовленные из трехслойного материала СИАЛ, помещали в эксикатор при 100 %-ной относительной влажности. Критерием окончания экспозиции образцов служили определенные уровни их влагонасыщения, соответствующие 7 и 21 сут испытаний (прирост массы 0,025 и 0,05 % – для трехслойного СИАЛ и 0,06 и 0,065 % – для пятислойного СИАЛ). При испытаниях проводили периодическое взвешивание образцов, и по мере достижения заданных уровней влагосодержания образцы для определения механических характеристик при растяжении снимали с испытаний.

Результаты и обсуждение

Для оценки влияния воздействия агрессивных факторов внешней среды на свойства соединений слоистого металлокерамического материала, а именно влагонасыщения на прочностные характеристики и выдержки конструктивно-подобных образцов в камере солевого тумана на малоцикловую усталость соединений СИАЛ, проведен ряд исследований.

Так, проведено исследование воздействия солевого тумана на развитие коррозионных поражений на образцах слоистого металлогластикопластика на основе сплава 1441 с системой комплексной защиты (на основе грунтовки ЭП-0215 и эмали ВЭ-69) и без нее.

По результатам исследования влияния солевого тумана на развитие коррозионных поражений установлено, что при выдержке 336 ч в камере солевого тумана коррозионные поражения на всех исследуемых образцах, в том числе и с нанесенной системой защиты, отсутствовали. После выдержки 720 ч в камере солевого тумана на образцах с нанесенной системой защиты коррозионные поражения отсутствовали, на образцах СИАЛ без системы защиты присутствовали единичные коррозионные поражения внешних металлических листов – питтинги.

Для оценки коррозионных поражений использовали величину максимальной глубины питтинга. С помощью конфокального микроскопа Plu Neox провели оценку глубины питтингов на образцах слоистого материала СИАЛ. Показано, что максимальная глубина питтингов, образовавшихся на внешних металлических листах в структуре СИАЛ без системы защиты после выдержки 720 ч в камере солевого тумана, составляет от 20 до 35 мкм (рис. 3).

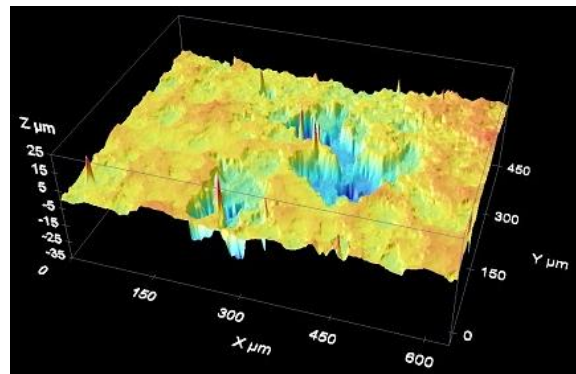


Рис. 3. 3D-профилограмма питтингового коррозионного поражения на образце материала СИАЛ без системы защиты после выдержки в течение 720 ч в камере солевого тумана

По результатам испытаний на воздействие солевого тумана можно заключить, что в случае повреждения противокоррозионной защиты до анодной пленки время появления коррозионных поражений на образцах материала СИАЛ составит менее 720 ч.

Проведено исследование обратимого и необратимого влияния влаги на механические свойства образцов из слоистого металлогластикопластика с применением листов из сплава 1441 и стеклопластиков. Изучение данного вопроса необходимо для анализа влияния влаги непосредственно на образцы заклепочных соединений. Заметим, что влияние влаги на алюминиевую составляющую слоистого металлогластикопластика незначительно, поскольку алюминиевые сплавы в нейтральных безхлоридных средах (другие депассиваторы менее распространены) проявляют высокую коррозионную стойкость.

Предварительно для выбора уровней влагонасыщения проведено исследование изменения массы образцов длиной 100 мм и шириной от 10 до 50 мм, вырезанных в продольном и поперечном направлениях, при испытаниях в климатической камере Climats Excal. Показано, что для образцов шириной 10 и 25 мм наблюдалось различие между приростом массы при вырезке в продольном и поперечном направлениях: при одинаковых геометрических размерах образцы, вырезанные в поперечном

направлении, набирали больше влаги (рис. 4). Для образцов шириной 50 мм относительный прирост массы существенно меньше, поскольку влага может проникать только через торцы образцов и эффект ориентации образцов при вырезке пренебрежимо мал. Для пятислойного материала СИАЛ наблюдались аналогичные эффекты.

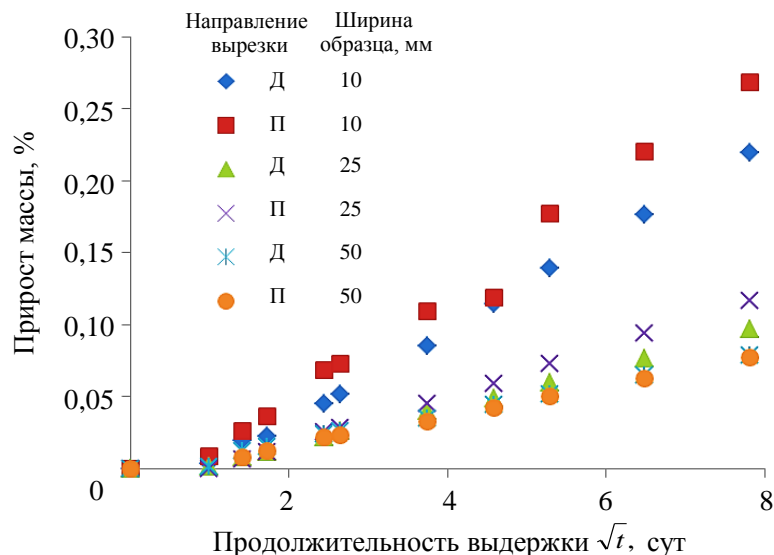


Рис. 4. Зависимость удельного прироста массы образцов трехслойного материала СИАЛ от продолжительности выдержки в климатической камере

Для исследования обратимого и необратимого влияния влаги на механические свойства слоистого металлостеклопластика на основе сплава 1441 использовали образцы в виде лопаток размером 25×240 мм и образцы-свидетели в виде прямоугольных пластин размером 100×10 мм, изготовленные из трехслойного материала СИАЛ в поперечном направлении. Выбор поперечного направления обусловлен тем, что в данном направлении влагонасыщение максимально. Результаты исследования механических свойств при растяжении образцов СИАЛ двух структур в исходном состоянии и после обратимого и необратимого влагонасыщения приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты исследования механических свойств при растяжении образцов СИАЛ пятислойной структуры в исходном состоянии и после обратимого и необратимого влагонасыщения

Свойства	Значения свойств*				
	в исходном состоянии	при уровне влагонасыщения, соответствующем приросту массы, %			
		0,06		0,065	
		без сушки	после сушки	без сушки	после сушки
σ_b , МПа	$\frac{640-650}{650}$	$\frac{630-630}{630}$	$\frac{620-630}{630}$	$\frac{630-630}{630}$	$\frac{625-630}{630}$
$\sigma_{0,2}$, МПа	$\frac{310-315}{315}$	$\frac{310-310}{310}$	$\frac{310-315}{315}$	$\frac{310-315}{315}$	$\frac{310-310}{310}$
δ , %	$\frac{2,9-3,1}{3,0}$	$\frac{3,0-3,1}{3,05}$	$\frac{2,9-3,0}{3,95}$	$\frac{3,0-3,1}{3,0}$	$\frac{2,9-3,0}{3,95}$

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Видно, что значения механических свойств при растяжении материалов СИАЛ, определенные на образцах двух структур, после влагонасыщения как обратимого, так и необратимого практически не изменились. Вероятно, влагонасыщение СИАЛ незначительно влияет на статические прочностные свойства, а основное влияние будут оказывать коррозионные поражения, поскольку основная площадь слоистого металлостеклопластика защищена алюминиевой поверхностью. Это также подтверждается данными работы [21], в которой зарубежными учеными показано, что выдержка образцов в течение 6 недель при повышенной температуре 80 °С и влажности 90 % RH не оказала влияния на значения предела прочности слоистого алюмостеклопластика GLARE при растяжении и сжатии. Вследствие этого для определения изменения механических свойств образцов СИАЛ в процессе климатических испытаний рекомендуется использовать данные по усталостной долговечности.

Таблица 2

**Результаты исследования механических свойств
при растяжении образцов СИАЛ трехслойной структуры
в исходном состоянии и после обратимого и необратимого влагонасыщения**

Свойства	Значения свойств*				
	в исходном состоянии	при уровне влагонасыщения, соответствующем приросту массы, %			
		0,06		0,065	
		без сушки	после сушки	без сушки	после сушки
σ_b , МПа	$\frac{750-760}{760}$	$\frac{740-760}{750}$	$\frac{735-745}{740}$	$\frac{730-740}{740}$	$\frac{740-750}{750}$
$\sigma_{0,2}$, МПа	$\frac{310-320}{315}$	$\frac{320-325}{325}$	$\frac{315-320}{315}$	$\frac{315-320}{315}$	$\frac{315-320}{320}$
δ , %	$\frac{2,7-2,9}{2,8}$	$\frac{2,7-2,8}{2,75}$	$\frac{2,6-2,7}{2,7}$	$\frac{2,7-2,7}{2,7}$	$\frac{2,7-2,8}{2,75}$

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Провели оценку влияния коррозионных поражений после выдержки в течение 30, 60 и 90 сут (рис. 5) в камере солевого тумана и 60 сут в климатической камере на усталостную долговечность конструктивно-подобных образцов заклепочных соединений из материала СИАЛ (рис. 6).

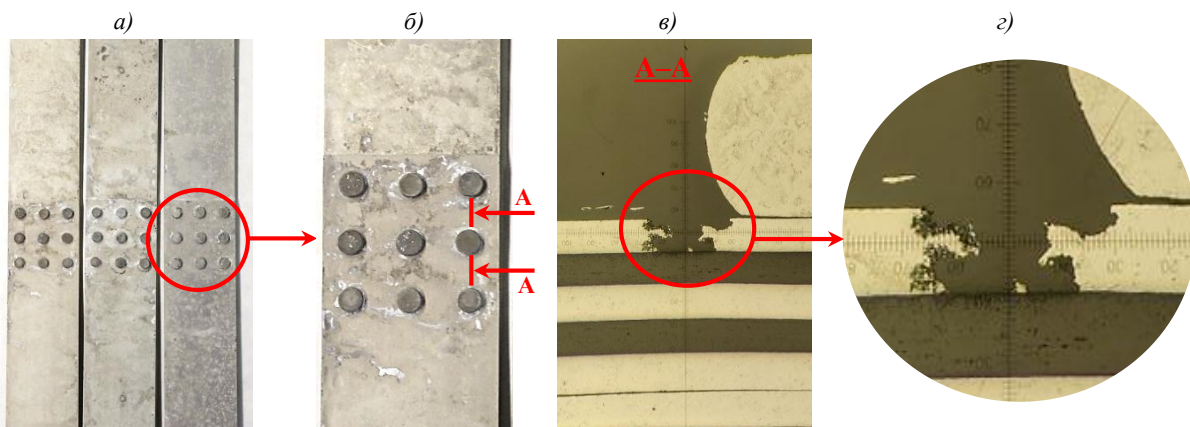


Рис. 5. Характерный вид образцов заклепочных соединений из материала СИАЛ без системы защиты после выдержки 90 сут в камере солевого тумана: *а*, *б* – внешний вид образцов; *в*, *г* – коррозионные поражения внешнего листа в материале СИАЛ

Испытания конструктивно-подобных образцов заклепочных соединений металлополимерного материала на малоцикловую усталость провели при величине максимальной нагрузки, равной 12,35 кН – для образцов из пятислойного СИАЛ и 9,50 кН – для образцов из трехслойного СИАЛ. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

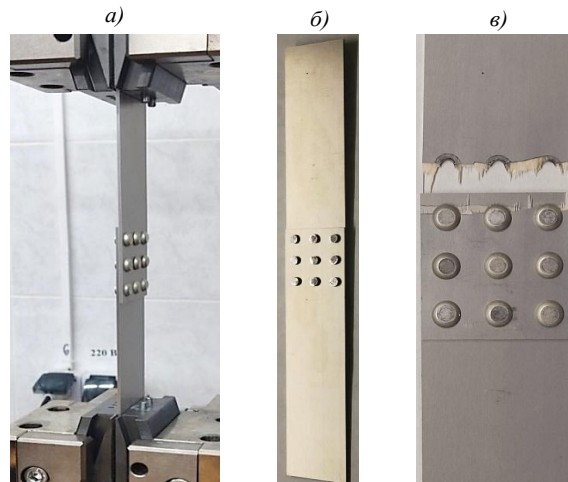


Рис. 6. Испытания на малоцикловую усталость конструктивно-подобных образцов заклепочных соединений из материала СИАЛ: а – образец, установленный в испытательную машину; б, в – вид образца в исходном состоянии и после испытаний соответственно

Таблица 3

Результаты испытаний на малоцикловую усталость конструктивно-подобных образцов после предварительной выдержки в агрессивных средах

Тип образца	Продолжительность экспозиции в камере солевого тумана, сут	Среднее значение усталостной долговечности N , цикл	Изменение долговечности, %
Образец из трехслойного СИАЛ	30	59950	24,7
	60	37780	52,5
	90	35203	55,8
	60*	67930	14,6
Образец из пятислойного СИАЛ	30	66083	21,2
	60	57543	31,4
	90	48320	42,4
	60*	74720	10,9

* В климатической камере.

При испытаниях в камере солевого тумана в течение 90 сут изменение усталостной долговечности для конструктивно-подобных образцов из трехслойного СИАЛ составило 55,8 % от исходной величины при усталостной нагрузке 9,50 кН, для конструктивно-подобных образцов из пятислойного СИАЛ: 42,4 % от исходной величины при усталостной нагрузке 12,35 кН.

С учетом того, что изменения статических механических свойств после проведения ускоренных испытаний для анализа эффективности системы противокоррозионной защиты слоистых металлогластопластиков будут малоинформативны, для оценки влияния воздействий агрессивных факторов внешней среды на конструктивно-подобные образцы с системой защиты необходимо определить наличие коррозионных поражений и исследовать их характеристики, а также использовать данные по изменению усталостной долговечности.

С увеличением продолжительности выдержки при коррозионных испытаниях в большинстве случаев на поверхности образца образуется слой продуктов коррозии, который уменьшает доступ к поверхности материала активной среды, а со временем окончательно исключает контакт с ней.

Заключения

Исследования влияния солевого тумана на развитие коррозионных поражений показали, что при выдержке 336 ч в камере солевого тумана коррозионные поражения на всех исследуемых образцах слоистого металlostеклопластика СИАЛ, в том числе и с нанесенной системой защиты, отсутствуют. После выдержки 720 ч в камере солевого тумана на образцах с нанесенной системой защиты коррозионные поражения отсутствуют, на образцах СИАЛ без системы защиты присутствуют единичные коррозионные поражения внешних металлических листов – питтинги.

Многослойная структура алюмостеклопластика препятствует развитию коррозионных поражений в слоях по толщине образца. Коррозионные поражения возникают только на внешних поверхностях металлических листов в случае нарушений антикоррозионной защиты. Выполнение требований антикоррозионной защиты и герметизация торцевых поверхностей и зон установки крепежа обеспечивает высокий уровень эксплуатационных характеристик алюмостеклопластиков при любых условиях внешней среды.

Показано, что влага проникает в объем материала СИАЛ только через торцы образца, так как его плоскость покрыта непроницаемыми для молекул воды металлическими листами. Установлено, что после влагонасыщения (как обратимого, так и необратимого) значения механических свойств при растяжении образцов из СИАЛ трехслойной и пятислойной структур практически не изменились.

Исследования влияния воздействий агрессивных факторов внешней среды при испытаниях в камере солевого тумана, имитирующих воздействие тропического климата, включая морской туман, на усталостные свойства соединений слоистого металlostеклопластика (с системой комплексной защиты и без нее) показали, что малоцикловая усталость после выдержки образцов 30, 60 и 90 сут в камере солевого тумана снижается. При испытаниях в камере солевого тумана в течение 90 сут усталостная долговечность для конструктивно-подобных образцов из трехслойного СИАЛ составила 55,8 % от исходной величины при усталостной нагрузке 9,50 кН, для конструктивно-подобных образцов из пятислойного СИАЛ: 42,4 % от исходной величины при усталостной нагрузке 12,35 кН.

При условии надежной антикоррозионной защиты торцевых поверхностей деталей из СИАЛ по периметру и отверстий под крепеж обеспечивается повышенная коррозионная стойкость. Способом защиты этих поверхностей является нанесение грунтов, эмалей, герметиков по схемам в соответствии с требованиями конструкторской документации.

Библиографический список

1. Шестов В.В., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Конструкционные слоистые алюмостеклопластики 1441-СИАЛ // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. № 9. С. 28–32.
2. Шестов В.В., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Нефедова Ю.Н. Структура и свойства тонких листов Al–Li сплава 1441 и слоистый алюмостеклопластик на их основе // *Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов: сб. докладов науч.-техн. конф. М., 2016. С. 7.*
3. Подживотов Н.Ю., Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю., Абдуллин М.Р., Лимонин М.В. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов // *Перспективные материалы*. 2016. № 10. С. 5–19.
4. Антипов В.В., Шестов В.В., Рябов Д.К. Коррозионная стойкость и механические свойства слоистого конструкционного материала на основе тонких листов алюминиевых сплавов и стеклопластика // *Металлург*. 2016. № 11. С. 81–85.
5. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмостеклопластики на их основе // *Цветные металлы*. 2016. № 8. С. 86–91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13.

6. Оглодков М.С., Щетинина Н.Д., Рудченко А.С., Пантелеев М.Д. Направления развития перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационно-космической техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
7. Gunnink J.W., Vlot A., De Vries T.J., Van Der Hoeven W. GLARE technology development 1997–2000 // *Applied Composite Materials*. 2002. Vol. 9. Is. 4. P. 201–219.
8. Qi C., Zhidong G., Zengshan L. et al. Experimental investigation on impact performances of GLARE laminates // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2015. Vol. 28. Is. 6. P. 1784–1792.
9. Nikolaos H., Alexopoulos D., Dalakouras Charis J. et al. Accelerated corrosion exposure in ultra-thin sheets of 2024 aircraft aluminium alloy for GLARE applications // *Corrosion Science*. 2012. No. 55. P. 289–300.
10. Syed A.K., Zhang X., Moffatt J.E., Fitzpatrick M.E. Effect of temperature and thermal cycling on fatigue crack growth in aluminium reinforced with GLARE bonded crack retarders // *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 98. P. 53–61.
11. Gisario A., Barletta M. Laser forming of glass laminate aluminium reinforced epoxy (GLARE): On the role of mechanical, physical and chemical interactions in the multi-layers material // *Optics and Lasers in Engineering*. 2018. Vol. 110. P. 364–376.
12. 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.
13. Оглодкова Ю.С., Селиванов А.А., Лукина Е.А., Зайцев Д.В. Влияние температурно-временных параметров ступенчатого старения на структуру, фазовый состав, механические и коррозионные свойства листов из сплава 1441 // *Металлы*. 2020. № 6. С. 12–21.
14. Антипов В.В., Старцев О.В., Сенаторова О.Г. Закономерности влагопереноса в СИАЛх // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. № 3. С. 13–18.
15. Варченко Е.А., Ветрова Е.Ю. Исследование биологической и коррозионной стойкости образцов алюминиевого сплава после натуральных испытаний в Геленджикской бухте. Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2020. № 6–7 (89). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-91-100.
16. Абрамова М.Г., Гончаров А.А. Межкристаллитная коррозия деформируемых алюминиевых сплавов при натуральных и натурно-ускоренных климатических испытаниях // *Труды ВИАМ*. 2019. № 11 (83). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-85-94.
17. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В., Антипов В.В., Вдовин А.И. Разработка раствора для нанесения коррозионных поражений на алюминиевых сплавах в гальваностатическом режиме // *Труды ВИАМ*. 2018. № 9 (69). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-105-118.
18. Курс М.Г., Кутырев А.Е., Киричок П.Ф., Фомина М.А. Ускоренные и циклические коррозионные испытания авиационных материалов // *Труды ВИАМ*. 2019. № 10 (82). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-61-75.
19. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
20. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
21. Botelho E.C., Almeida R.S., Pardini L.C., Rezende M.C. Elastic properties of hygrothermally conditioned glare laminate // *International Journal of Engineering Science*. 2007. Vol. 45 (1). P. 163–172.