

Научная статья

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-97-113

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ, КОМПЛЕКСА СЛУЖЕБНЫХ СВОЙСТВ И ПРИМЕНЕНИЕ В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ ГИБРИДНЫХ СЛОИСТЫХ АЛЮМОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Антипов¹, А.И. Асташкин², А.А. Селиванов², Е.А. Ткаченко²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Санкт-Петербург, Россия; mail@crism.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Приведен обзор научно-технической информации о структуре и свойствах гибридных слоистых алюмополимерных композиционных материалов. Показаны преимущества использования стекловолокна (в материалах классов СИАЛ и GLARE) по сравнению с арамидным (в материалах классов АЛОП и ARALL) и углеродными (в материалах классов АЛКАР и CARALL) волокнами. Результаты анализа показывают, что в сравнении с листами из монолитных алюминиевых сплавов алюмопластики обладают уникальным комплексом свойств: пониженной плотностью, высокой удельной прочностью, повышенной трещиностойкостью, стойкостью к ударным нагрузкам, огнестойкостью и хорошей ремонтопригодностью.

Ключевые слова: слоистые металлополимерные материалы, алюмопластик СИАЛ, алюмоорганопластик АЛОП, алюмоуглепластик АЛКАР, применение, структура, свойства металлополимерных композиционных материалов

Для цитирования: Антипов В.В., Асташкин А.И., Селиванов А.А., Ткаченко Е.А. Особенности формирования структуры, комплекса служебных свойств и применение в авиационной технике гибридных слоистых алюмополимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2026. № 3 (157). С. 97–113. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-97-113.

Scientific article

FEATURES OF THE FORMATION OF THE STRUCTURE, COMPLEX OF SERVICE PROPERTIES AND THE USE OF HYBRID LAMINATE ALUMOPOLYMER COMPOSITE MATERIALS IN AIRCRAFT CONSTRUCTION

V.V. Antipov¹, A.I. Astashkin², A.A. Selivanov², E.A. Tkachenko²

¹Federal State Unitary Enterprise «Prometey Central Scientific Research Institute Of Structural Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Saint Petersburg, Russia; mail@crism.ru

²Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. An overview of scientific information on the structure and properties of hybrid fiber metal laminate aluminum-polymer composite materials is given. The advantages of using fiberglass (in SIAL, GLARE) in comparison with aramid fiber (in ALOR, ARALL) and carbon fiber (in ALCAR, CARALL) are shown. The results of the review show that, in comparison with sheets made of monolithic aluminum alloys, aluminum-glass plastics have a unique set of properties: low density, high specific strength, increased crack resistance, resistance to shock loads, fire resistance and good maintainability.

Keywords: laminate metal-polymer materials, SIAL aluminum-fiberglass, ALOR aluminum-organoplastics, ALCAR, application, structure, properties of metal-polymer composite materials

For citation: Antipov V.V., Astashkin A.I., Selivanov A.A., Tkachenko E.A. Features of the formation of the structure, complex of service properties and the use of hybrid laminate alumopolymer composite materials in aircraft construction. *Trudy VIAM*, 2026, no. 3 (157), pp. 97–113. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-97-113.

Введение

Современное авиастроение находится в состоянии постоянного поиска решения комплексной задачи по снижению массы летательного аппарата, повышению ресурса, обеспечению живучести и безопасности эксплуатации изделий. Одним из наиболее перспективных решений, отвечающих этим требованиям, является применение гибридных слоистых металлополимерных композиционных материалов (МПКМ), сочетающих лучшие свойства металлов и полимерных композитов. Ответом на потребность в более легких, прочных и надежных конструкционных материалах для изделий нового поколения стала разработка алюмополимерных композитов и технологических процессов изготовления из них деталей для применения в конструкциях изделий авиационной техники. Работы по созданию слоистых МПКМ (Fiber Metal Laminate – FML) в России и за рубежом для нужд авиационной промышленности активно ведутся с 1970-х гг. [1–9].

Сравнение служебных характеристик МПКМ и монолитных металлических листов представлено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение служебных характеристик металлополимерных композиционных материалов и монолитных металлических листов

Характеристики	Значения характеристик для		
	слоистых материалов	монолитных алюминиевых сплавов	титановых сплавов
Плотность, г/см ³	2,3–2,5	2,8	4,5
Предел прочности при растяжении, МПа	≥600	410–630	≥630
Трещиностойкость	В 10 раз выше	Базовая	Высокая
Огнестойкость при 1100 °С, мин	15	1,5–2	Высокая

Основные типы металлополимерных композиционных материалов

В состав МПКМ входят чередующиеся тонкие листы из металла толщиной 0,2–0,5 мм и полимерного композиционного волокнистого материала преимущественно на основе эпоксидного связующего толщиной ~0,125 мм.

Основными коммерчески доступными материалами в настоящее время считаются материалы на основе алюминиевых сплавов, производимые за рубежом под торговыми марками ARALL, CARALL, GLARE, и их российские аналоги АЛОП, АЛКАР и СИАЛ соответственно. Название торговых марок является акронимом, образованным из начальных букв наименования типа волокна, используемого для армирования (арамидное, углеродное, стекловолокно), и алюминиевого сплава.

Разработка слоистого волокнистого композиционного материала ARALL (ARamid ALuminium Laminate) началась в 1978 г. (Delft University of Technology, Нидерланды). Материалы класса ARALL представляют собой структуру, состоящую из нескольких слоев тонкого алюминиевого листа толщиной 0,2–0,4 мм и прослойки из препрега (однонаправленного или равнопрочного), армированного органическими волокнами [1, 2, 4, 5, 8–10].

В СССР в это же время проводили работы по исследованию слоистых металлополимерных материалов первого поколения – марки АЛОП (АЛюминий + ОРганопластик), аналогичных по структуре материалу ARALL [3, 6, 7].

Применение материалов класса АЛОП взамен листов из алюминиевых сплавов обеспечило повышение сопротивления усталости и трещиностойкости конструкции (в >1,2 и 5–20 раз соответственно) при более высокой прочности и стойкости к ударным воздействиям (табл. 2) [5, 6].

Таблица 2

**Сравнительные характеристики материалов класса АЛОП
и листов из алюминиевого сплава Д16ч-АТ**

Характеристики	Значения характеристик для		
	ортотропно-армированного материала АЛОП Д16/41	однонаправленного материала АЛОП Д16/41Н	листов из сплава Д16ч-АТ
Плотность ρ , г/см ³	2,35	2,25	2,78
Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	450	700	415
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	350	500	275
Модуль упругости при растяжении E , ГПа	62	69	72
Малоцикловая усталость, кцикл ($\sigma_{max} = 157$ МПа)	120	Более 200	120
Скорость роста трещины усталости dl/dN , мм/кцикл ($\Delta K = 31$ МПа $\sqrt{м}$)	0,2	0,1	2,0
Примечание. Слоистые композиты АЛОП Д16/41 и АЛОП Д16/41Н состоят из трех листов из алюминиевого сплава Д16ч-АТ толщиной 0,47 мм и двух слоев органопластика толщиной 0,15 мм, армированного арамидными волокнами СВМ.			

Работы по созданию и исследованию алюмоуглепластиков проводили в различных странах: в Европе и Австралии – материалов класса CARALL (Carbon Reinforced Aluminium Laminate), в России – материалов класса АЛКАР (АЛюминий + КАРбон) [6, 10–13].

Использование для армирования полимерных прослоек углеродных волокон, имеющих низкую плотность (~1,4 г/см³) и высокий модуль упругости ($E \approx 140$ ГПа), позволило разработать алюмоуглепластик АЛКАР Д16/14-3, который имел следующие механические характеристики: $E = 87\text{--}93$ ГПа, $\sigma_b = 860\text{--}900$ МПа, $\sigma_{сж} = 690\text{--}720$ МПа [12, 13].

Однако несмотря на высокое сопротивление усталости и низкую плотность, эти материалы имеют ряд ограничений: хотя углеродное волокно обеспечивало высокую жесткость и прочность композиционных материалов, наличие гальванической пары «алюминий–углерод» вызывало риск контактной коррозии [13], а разница в значениях коэффициента теплового линейного расширения приводила к высоким остаточным напряжениям и снижению сопротивления усталости [10]. Арамидное волокно обладало повышенной гигроскопичностью, недостаточной стойкостью при сжатии, склонностью к образованию дефектов и создавало сложности при механической обработке ввиду высокой прочности и вязкости [4–6], а также имело высокую стоимость по сравнению со стекловолокном.

Указанные недостатки слоистых МПКМ с арамидным и углеродным волокном явились предпосылкой для разработки в конце 1980-х гг. слоистых композиционных материалов второго поколения – алюмостеклопластиков: СИАЛ (Стеклопластик И АЛюминий) в России и GLARE (Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy) за рубежом [14–19].

Алюмостеклопластики представляют собой конструкционные листовые гибриды, состоящие из чередующихся тонких листов из алюминиевых сплавов, в том числе алюминий-литиевых, и полимерных прослоек, армированных стекловолокном.

Стекловолокно, будучи диэлектриком и химически совместимым с алюминием, позволило устранить основные недостатки алюмопластиков предыдущих поколений.

В настоящее время материалы класса СИАЛ являются в Российской Федерации основным семейством МПКМ, обладающих повышенными прочностными характеристиками при статическом и ударном нагружении в сравнении с алюмоорганопластиком ARALL.

Алюмостеклопластики имеют исключительный комплекс служебных характеристик. По сравнению с листами из алюминиевых сплавов они обладают: пониженной плотностью (на 10–15 %), повышенной трещиностойкостью (скорость роста трещины усталости в 5–10 раз ниже), высокой удельной прочностью ($\sigma_v = 600\text{--}1300$ МПа), огнестойкостью (выдерживают воздействие температуры до 1100 °С в течение ≥ 15 мин) и хорошей ремонтпригодностью. Эти качества делают их идеальными материалами для ответственных элементов конструкций воздушных судов, подвергаемых усталостным и ударным нагрузкам [13, 15, 17, 19].

Структура и принципы конструирования материалов класса СИАЛ

Алюмостеклопластик представляет собой симметричный пакет с нечетным количеством слоев (например, 3/2, 5/4, где первое число – количество металлических слоев, второе – полимерных прослоек), что предотвращает коробление.

Типичная структура материала класса СИАЛ включает (рис. 1):

– внешние слои – лакированные листы из алюминиевых сплавов толщиной 0,25–0,6 мм (Д16ч-АТ, 1163-АТ, 1441-Т11 и др.) для молниезащиты, коррозионной стойкости и возможности клепки;

– внутренний слой (для материалов с количеством слоев 3/2) – нелакированный алюминиевый лист и полимерные прослойки: 2–4 монослоя клеевых препрегов на основе эпоксидного связующего (ВК-41, ВСК-14-2мР), армированных стеклянной тканью (Т-10) или ровингом (R-10) с содержанием волокон 55–70 % (объемн.).

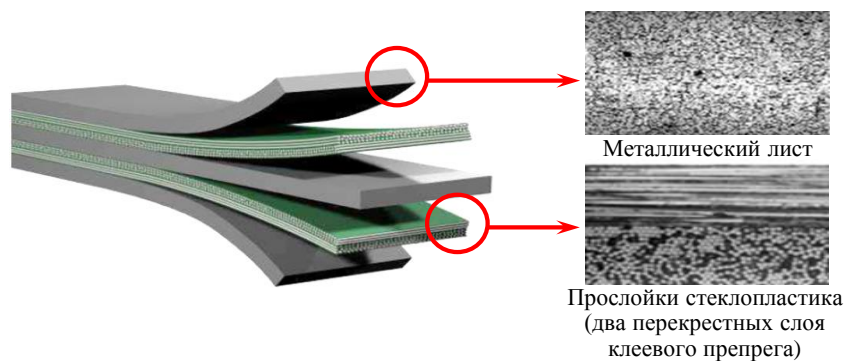


Рис. 1. Структура пятислойного алюмостеклопластика [16]

Тип армирования подбирается с учетом характера нагружения:

- однонаправленное [0°] (СИАЛ-1/GLARE-1) – для зон растяжения;
- асимметричное в соотношении 70/30 (СИАЛ-2/GLARE-4) – для смешанного нагружения;
- перекрестное [0°/90°] (СИАЛ-3/GLARE-3) – для обеспечения изотропности свойств элементов конструкции (фюзеляж, полы).

**Механизмы формирования комплекса служебных свойств
Механические характеристики при растяжении и сжатии,
коррозионная стойкость**

Результаты испытаний на растяжение образцов алюмостеклопластиков на основе алюминий-литиевого сплава 1441-T11 и стеклопластиков, имеющих пятислойные структуры (3/2) – однонаправленную (СИАЛ-1-1Р) и равнопрочную (СИАЛ-3-1Р), представлены в табл. 3. Для сравнения приведены характеристики листов толщиной 1,5 мм из алюминиевого сплава 1163-Т, широко используемого в конструкциях самолетов [17–19].

Таблица 3

**Механические свойства при растяжении алюминиевого сплава
и материалов класса СИАЛ с различной схемой армирования стеклопластика**

Материал	Направлен- ные вырезки образца	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Предел теку- чести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Модуль упругости E , ГПа
СИАЛ-1-1Р	Д	1030±45	335±10	4,5±0,5	71,0±1,0
	П	278±2	257±2	4,4±0,2	58,0±0,1
СИАЛ-3-1Р	Д	605±5	267±2	4,2±0,2	66,1±0,1
	П	595±3	265±2	4,1±0,2	65,2±0,2
Сплав 1163-Т	П	≥405	≥265	≥13,0	≥70,0

Алюмостеклопластик СИАЛ-1-1Р с однонаправленной ориентацией армирующих волокон обладает существенной анизотропией, особенно предела прочности при растяжении. У материала СИАЛ-3-1Р с равнопрочным армированием механические свойства в продольном и поперечном направлениях близки между собой.

Использование однонаправленного армирования алюмостеклопластика ровингом позволяет получать более высокий уровень механических свойств, чем при армировании равнопрочными тканевыми препрегами, при прочих равных условиях [16, 20].

Установлены следующие закономерности формирования механических свойств при растяжении и сжатии в исследуемых слоистых МПКМ:

– предел прочности при растяжении материалов класса СИАЛ в направлении армирования в большей степени зависит от σ_b стекловолокна (~2000 МПа) и алюминий-литиевых листов (~440 МПа) в соответствии с объемной долей (количеством и толщиной) слоев; для равнопрочного материала класса СИАЛ $\sigma_b = 600–700$ МПа в обоих направлениях, для однонаправленных структур $\sigma_b = 1000–1200$ МПа в продольном направлении;

– предел текучести алюмостеклопластика непосредственно обусловлен $\sigma_{0,2}$ металлических листов и в продольном и поперечном направлениях составляет 335 и 257 МПа соответственно;

– относительное удлинение материалов класса СИАЛ не превышает удлинения стекловолокна ($\delta = 3,0$ %) и практически не зависит от направления армирования клеевого препрега ($\delta = 4,1–4,7$ %);

– модуль упругости при растяжении и сжатии алюмостеклопластиков зависит от схемы армирования и объемного содержания металла в структуре слоистой композиции. При увеличении в структуре объемной доли алюминий-литиевых листов модули упругости при растяжении и сжатии повышаются ($E \approx 70$ ГПа, $E_{сж} \approx 71$ ГПа), однако их уровень ниже, чем у листов из алюминий-литиевых сплавов ($E = 79–80$ ГПа, $E_{сж} = 80–81$ ГПа) [13, 17–20].

При эксплуатации авиационной конструкции материал подвергается длительным низкотемпературным нагревам (солнечным, технологическим и др.). Показано

[19], что длительные температурные нагревы при температурах 85 и 125 °С в течение 1000 ч не оказывают существенного воздействия на механические свойства, определяемые при растяжении при комнатной температуре.

Наибольшему влиянию коррозионных факторов слоистые материалы класса СИАЛ подвергаются со стороны внешних металлических листов и с торцевых поверхностей, что может изменять свойства алюмокомпозитов вследствие химических и электрохимических процессов, а также влагопоглощения и деструкции полимерных слоев. При условии надежной антикоррозионной защиты торцевых поверхностей деталей по периметру и отверстий под крепеж, а также поверхности внешнего алюминиевого листа структура гибридных слоистых алюмокомпозитов обеспечивает повышенную коррозионную стойкость деталей при эксплуатации [19–21].

Для защиты деталей из алюмокомпозитов от коррозионных повреждений применяют нанесение грунтов, эмалей, герметиков по схемам в соответствии с нормативными документами и требованиями конструкторской документации.

Трещиностойкость и сопротивление усталости

Важнейшее преимущество материалов класса СИАЛ перед металлическими материалами – способность останавливать развитие усталостной трещины. Когда микротрещина длиной 1–2 мм возникает в алюминиевом слое, стекловолокна в полимерной прослойке остаются целыми, создавая «мостиковый эффект», снижая коэффициент интенсивности напряжений ΔK и перераспределяя нагрузку на соседние слои, что препятствует появлению сквозных трещин.

В результате скорость роста трещины в материалах класса СИАЛ составляет $\leq 0,3$ мм/цикл при $\Delta K = 31$ МПа $\sqrt{м}$, тогда как в листах из сплава Д16ч-АТ – до 2,5 мм/цикл (в 8–10 раз больше).

Установлено, что снижение скорости роста трещины усталости в слоистых материалах класса СИАЛ, по сравнению с монолитными алюминиевыми листами, происходит из-за зигзагообразной траектории трещины вследствие ее ветвления в слоях стеклопластика [22–24], вызывающего в процессе испытаний расслоение образцов МПКМ (рис. 2).

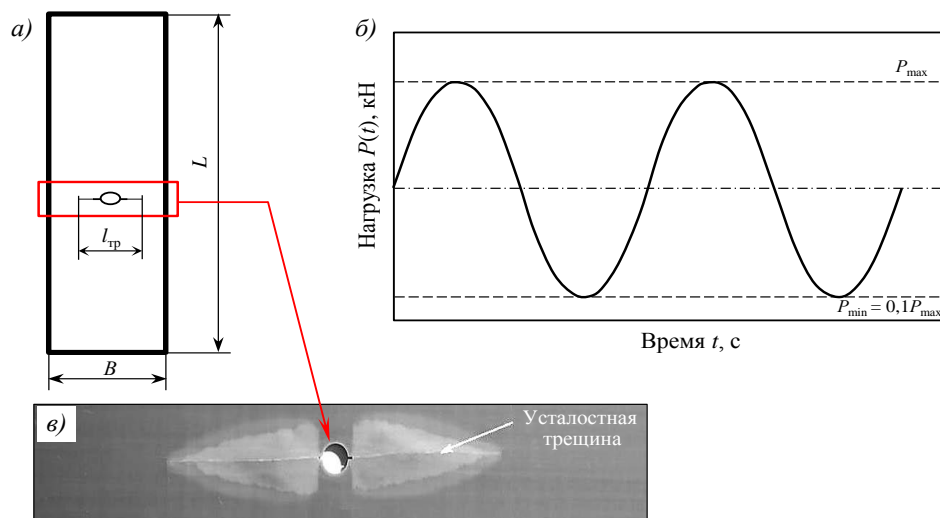


Рис. 2. Характер расслоений стеклопластика в материале класса СИАЛ после испытаний на трещиностойкость: *a* – образец для испытаний на скорость роста трещины усталости (B , L – ширина и длина образца соответственно, $l_{тр}$ – длина трещины); *б* – диаграмма нагружения при испытаниях на скорость роста трещины усталости; *в* – вид зоны расслоений в прослойках стеклопластика у концентратора после удаления внешних металлических листов

Усталостная трещина на поверхности слоистого материала может появиться раньше, чем в монолитных листах. Далее трещина растет очень медленно [22–24]. Сравнительные данные по влиянию структуры материала на скорость роста трещины усталости приведены на рис. 3 и 4.

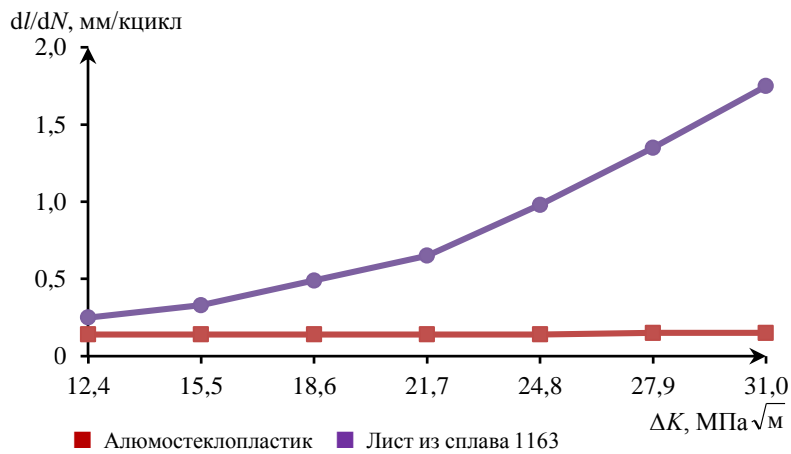


Рис. 3. Скорость роста трещины усталости в алюмокомпозитном материале и монолитном листе из сплава 1163 [22]

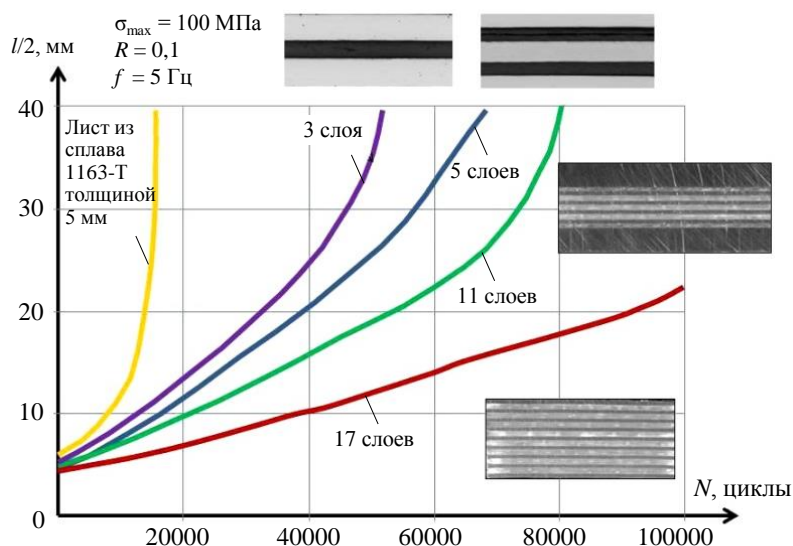


Рис. 4. Скорость роста трещины усталости в слоистых гибридных материалах и монолитном листе из сплава 1163 [24]

В процессе испытаний на усталостную долговечность (МЦУ) алюмокомпозитного материала установлено, что появление усталостной трещины происходит на стадии 20–30 % от числа циклов до полного разрушения в поверхностных слоях образцов из алюминий-литиевого сплава с дальнейшим развитием трещины и разрушением металлического листа. Долговечность продольных образцов материала марки СИАЛ-1-1 с однонаправленной схемой армирования существенно выше, чем образцов алюмокомпозитного материала СИАЛ-3-1 с перекрестным армированием. При этом получено, что характеристики МЦУ образцов алюмокомпозитного материала СИАЛ-3-1 с перекрестным армированием сравнимы с долговечностью монолитных листов из ресурсных сплавов 1163 и 1441 (табл. 4).

**Малоцикловая усталость продольных образцов материалов класса СИАЛ
на основе листов из сплава 1441 и алюминиевых сплавов**

Материал	Максимальное напряжение $\sigma_{\max}^{\text{нетто}}$, МПа	Число циклов до зарождения трещины во внешнем листе $N_{0\text{cp}}$, циклов	Среднее число циклов до разрушения N_{cp} , циклов
СИАЛ-3-1 (перекрестное армирование [0°/90°])	157	41000	188830
СИАЛ-1-1 (однонаправленное армирование [0°/0°])		71000	252030
Сплав 1441		–	173000
Сплав 1163		–	151980

Испытания конструктивно-подобных панелей фюзеляжа самолета Ан-148 [23, 24] также подтвердили преимущество материалов класса СИАЛ перед листами из традиционного обшивочного высокоресурсного сплава 1163. Живучесть панелей из алюмостеклопластика в ~2 раза превосходила живучесть панели из сплава 1163: долговечность панели из алюмостеклопластика СИАЛ на основе листов из сплава 1441 составила >305000 циклов, а панель из сплава 1163-АТ разрушилась при ~160000 циклов.

Ударная стойкость

Типичным видом эксплуатационных повреждений поверхностей конструкции самолетов могут быть повреждения ударного происхождения при монтажных и ремонтных работах. Поверхности листов из традиционных алюминиевых сплавов при местных повреждениях можно ремонтировать зачисткой и заменой участка поверхности с креплением на механическом крепеже.

Исследование слоистых образцов после испытаний показали [25], что ударная стойкость материалов класса СИАЛ возрастает с увеличением общего количества слоев в композите и толщины алюминиевых листов, а также благодаря применению перекрестного армирования монослоев стеклопластика, в связи с чем наиболее оптимальной является структура пятислойного (3/2) материала с четырьмя монослоями препрега с перекрестной укладкой [0°/90°/90°/0°] и толщиной листа из сплава Д16ч-АТ 0,5 мм. Энергия удара на пробой этой композиции не превышает 42 Дж, что сопоставимо с показателями зарубежного материала GLARE [26].

Ударостойкость алюмостеклопластиков на базе листов из сплава 1441-АТ1 ниже, чем у аналогичной композиции на основе листов из сплава Д16ч-АТ.

Энергия удара при пробое монолитных листов толщиной 1,5 мм ниже, чем для материалов класса СИАЛ, и имеет максимальные значения 34 Дж.

Сравнительные испытания показали [26], что, в отличие от углепластиков, материалы класса СИАЛ демонстрируют высокую устойчивость к низкоскоростным ударам (падающий груз, инструмент, техобслуживание), повреждения визуализируются (вмятины), что упрощает диагностику. При этом повреждения локализованы, трещины несквозные, остаточная прочность сохраняется на уровне 70–80 % даже при наличии вмятин глубиной до 6 мм.

Огнестойкость и огнестойкость

Для обеспечения безопасности при эксплуатации авиационной техники в обязательном порядке должны выполняться требования, предъявляемые к пожарной безопасности материалов и типовых конструктивных элементов на их основе. В ряде

параграфов Авиационных правил предъявляются требования к огнестойкости или огнестойкости материалов при воздействии открытого пламени в различных ситуациях при эксплуатации (наземный пожар от разлива топлива, пожар во внутренних отсеках, пожар в зонах двигателей и пожароопасной зоне материалов внешней обшивки и др.).

Для оценки возможности использования слоистого алюмокомпозитного материала в зонах конструкции самолета с повышенными требованиями пожарной безопасности проведены квалификационные испытания во ФГУП «ГосНИИ ГА» на образцах листов из сплава 1441 и композитного материала КМКС-2МР.120.РВМПН.30 применительно к облицовкам багажно-грузового отсека и противопожарным перегородкам. Сравнительная оценка результатов испытаний на огнестойкость, проведенных зарубежными (Airbus, Boeing) и отечественными (ВИАМ, ФГУП «ГосНИИ ГА») компаниями, показала, что отечественные и зарубежные материалы аналогичны по времени прогорания (табл. 5) [27–31].

Таблица 5

Сравнительная оценка огнестойкости материалов CLARE, СИАЛ и монолитных листов из алюминиевых сплавов толщиной 1,5–2,0 мм

Материалы		Условия испытаний	Результаты испытаний	Максимальная температура*, °С	Время*, мин
зарубежные (Европа, США)	отечественные				
GLARE 3-2/1	СИАЛ-3-2/1	1100±25 °С, 15 мин	Отсутствие сквозного прогорания	220	5
GLARE 3-3/2	СИАЛ-3-3/2			160	5
GLARE 4-2/1	СИАЛ-5-2/1			215	10
Сплав 2024-Т3	Сплав Д16ч-Т	1100±25 °С	Сквозное прогорание	Сквозное прогорание	1,5

* Значения для стороны, противоположной пламени.

При проведении испытаний всех типов алюмокомпозитных материалов при воздействии открытого пламени с температурой 1100 °С в течение 15 мин не наблюдали сквозного прогорания образца. Прогорание затронуло только наружный алюминиевый лист с частичным обугливанием поверхностного первого слоя композитного материала [27, 28, 31]. При аналогичных условиях испытания сквозное прогорание монолитного листа от пламени с температурой 1100 °С наступает через 1,5 мин, т. е. быстрее в >10 раз.

Зависимость изменения температуры на расстоянии 100 мм от поверхности образца представлена на рис. 5 [19, 28].

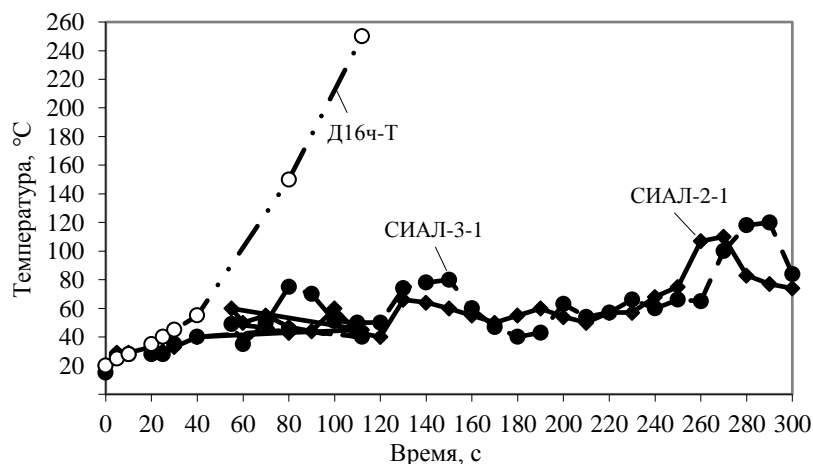


Рис. 5. Изменение температуры на расстоянии 100 мм от листов материалов класса СИАЛ и сплава Д16ч-Т с внешней стороны образца

Повышенная огнестойкость алюмокомпозитов связана со свойствами стекловолокна (плавление при температуре $>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) и абляционным эффектом при термодеструкции слоев композита, которые в сочетании с алюминиевыми слоями формируют барьер, предотвращающий сквозное прогорание. Материалы класса СИАЛ выдерживают воздействие температуры $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 15–20 мин без сквозного прогорания, не выделяют токсичных газов при термодеструкции. Это делает материал пригодным для зон с повышенными требованиями пожарной безопасности: мотогондол, багажных отсеков, противопожарных перегородок.

Плотность и весовая эффективность

Средняя плотность материалов класса СИАЛ составляет $2350\text{--}2400\text{ кг/м}^3$ против $2780\text{--}2810\text{ кг/м}^3$ у алюминиевых сплавов. При сохранении уровня прочности это обеспечивает снижение массы детали на 10–15 %.

Технологии производства

Изготовление заготовок деталей из материалов класса СИАЛ осуществляется методом автоклавного формования (температура $120\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление $0,6\text{--}0,8\text{ МПа}$).

Технологические режимы автоклавного формования (давления, температуры и времени выдержки при формовании) для получения стабильных свойств слоистых алюмокомпозитов выбирают с учетом конструктивных особенностей детали.

При формовании заготовок алюмокомпозитов учитывают температурно-временные параметры процессов отверждения клеевых связующих ВСК-14-2МР и ВСК-14-2м [32, 33], используемых в клеевых препрегах КМКС на основе стеклонанополнителей (ровинга и тканей Т-60(ВМП), Т-64(ВМП)), принимая также во внимание параметры режимов искусственного старения алюминиевых листов, входящих в структуру материалов класса СИАЛ.

Для изготовления крупногабаритных конструкций из алюмокомпозитов СИАЛ разработаны методы сращивания заготовок [19, 34] (рис. 6 и 7).

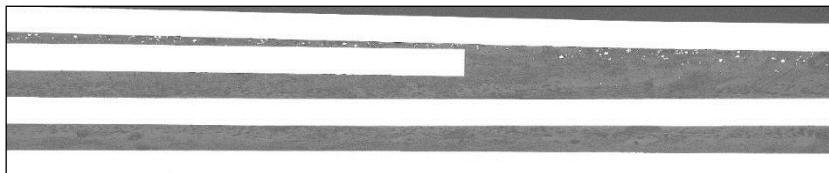


Рис. 6. Типовое сечение в зоне стыка листов в материале класса СИАЛ с использованием внутреннего межслойного дублера

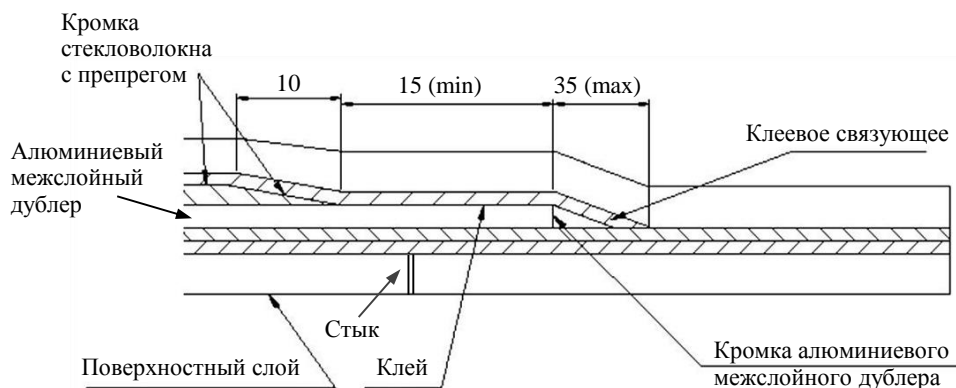


Рис. 7. Схема расположения слоев в зонах стыка с использованием внутренних межслойных дублеров

Оценка прочностных характеристик и трещиностойкости в зонах сращивания, проведенная на заготовках из материала СИАЛ-3-1 на базе листов из сплава 1441-РДТ11 и клеевого препрега на основе ровинга КМКС-2мР.120.РВМПН.30, показала, что служебные характеристики в зоне сращивания не уступают свойствам материала СИАЛ-3-1 с регулярной структурой [19, 35].

Применение технологии соединений слоистых алюмокомпозитов методом сращивания обеспечивает снижение массы конструкции на 10–15 % за счет уменьшения числа заклепочных стыков и снижения трудоемкости при сборочных работах.

Применение в авиационных конструкциях

Наиболее известной областью применения материалов GLARE-3 и GLARE-4 в настоящее время является изготовление деталей самолета Airbus A380: панелей верхней зоны фюзеляжа (27 панелей), кромки хвостового оперения, гермошпангоутов, соединительных лент. Применение всего 3 % (от общей массы) материалов класса GLARE в самолете Airbus A380 взамен традиционных алюминиевых сплавов позволило снизить массу конструкции на ~500 кг [36, 37].

В самолетах Fokker F27, Fokker 100, Boeing C-17, Boeing C-130 для панелей крыльев опробованы алюмоорганопластики марки ARALL, однако эти работы не нашли дальнейшего продолжения и не были внедрены из-за отмеченных недостатков и по экономическим причинам [4, 38].

Алюмоорганопластики применены также в самолетах Airbus A340-500/600 (передняя кромка крыла) и Boeing 777 (панели пола грузового отсека).

Слоистый алюмоуглепластик CARALL опробован в деталях, испытывающих ударные нагрузки (стойки вертолета, сиденья самолета) [19].

Применение МПКМ класса АЛОП для передней кромки крыла самолета Ан-124 позволило снизить ее массу на 10–15 % по сравнению с алюминиевым сплавом Д16ч-АТ [6].

Алюмокомпозит СИАЛ-3-1 (с трехслойной структурой на базе листов из сплава 1441-РТ1 толщиной 0,5 мм и прослойка композита на основе клея ВК-41 и равнопрочной ткани Т-10 из высокопрочного высокомодульного стекла) применен в качестве молниезащитных верхних панелей пилотных топливных баков самолета Бе-103 [39].

В военной и транспортной авиации материалы класса СИАЛ применяются в элементах хвостового оперения и для панелей мотогондол.

Применение в конструкции вертолета Ка-226 материала СИАЛ-2-1Р для створки капота двигателя взамен титанового сплава ОТ4 обеспечило снижение массы на 20 % и повышение огнестойкости до 1100 °С в течение 15 мин [33, 40].

Ограничения и перспективы

Достоинства материалов класса СИАЛ неоспоримы, однако имеются ограничения, к которым относятся:

- более высокая стоимость по сравнению с монолитными полуфабрикатами из алюминиевых сплавов (в 2–3 раза);
- сложность механической обработки (сверловка требует специальных режимов);
- ограниченная применяемость в зонах длительного воздействия высоких температур (>150 °С);
- требования к герметизации торцов (для предотвращения влагопоглощения).

Тем не менее в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» (комплексная научная проблема 6.2. «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы») в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ активно ведется разработка материалов класса

СИАЛ на основе алюминий-литиевых сплавов (1441, В-1469) для еще большего снижения массы [41], а также предлагаются для применения гибридные панели крыла и центроплана с комбинированным набором из профилей из сплавов системы Al-Li и технологии ремонта поврежденных участков методом локального использования накладок из материалов класса СИАЛ [42].

Заключения

Гибридные слоистые композиционные материалы – это не просто альтернатива традиционным металлам, а новый класс конструкционных материалов, сочетающих прочность металла, легкость композита и уникальную живучесть. Разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (СИАЛ) и зарубежные аналоги (GLARE) уже доказали свою эффективность в реальных конструкциях.

Уникальный набор служебных характеристик (высокие удельная статическая прочность, сопротивление усталости, трещиностойкость и коррозионная стойкость, повышенные огнестойкость, огнестойкость и устойчивость к ударам), существенно превышающих уровень свойств монолитных алюминиевых листов, делает слоистые МПКМ перспективными для будущих поколений авиационных конструкций.

Дальнейшее развитие направления связано с интеграцией цифровых технологий (цифровые двойники, оптимизация структуры компонентов композиционных материалов), использованием перспективных связующих (термопласты, самовосстанавливающиеся матрицы) и расширением геометрических возможностей формования (детали с двойной кривизной, интегральные панели).

Алюмокомпозиты являются наиболее перспективными МПКМ. Их уникальные свойства позволяют создавать более легкие, надежные и долговечные конструкции летательных аппаратов. Дальнейшее развитие этих материалов открывает новые перспективы для авиастроения и других отраслей промышленности.

Список источников

1. Laurens B.V. Development of a new hybrid material (ARALL) for aircraft structures // *Industrial & Engineering Chemistry*. 1983. No. 22 (3). P. 492–496.
2. Marissen R. Flight simulation behaviour of aramidreinforced aluminium laminates (ARALL) // *Engineering Fracture Mechanics*. 1984. Vol. 19. No. 2. P. 261–277.
3. Железина Г.Ф., Шалин Р.Е., Перов Б.В., Фридляндер И.Н., Кишкина С.И., Машинская Г.П., Загребалов А.А. Слоистый металлополимерный композит – АЛОП // Приложение 2 к журналу «Авиационная промышленность». М.: Машиностроение, 1985. С. 9–13.
4. Schijve J. Crack stoppers and ARALL laminates // *Engineering Fracture Mechanics*. 1990. Vol. 31. No. 2. P. 405–421.
5. Vogelesang L.B., Gunnink J.W. ARALL: A Materials Challenge for the next Generation of Aircraft // *Materials and Design*. 1986. Vol. 7. No. 6. P. 287–300.
6. Постнов В.И., Сенаторова О.Г., Железина Г.Ф., Казаков И.А., Абрамов П.А., Герасимов В.А., Постнова М.В. Опыт применения МПКМ АЛОП Д16/41 в носовой части крыла самолета Ан-124-100 // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. № 4 (13). С. 8–17.
7. Слоистые композиционные материалы – 98: сб. тр. междунар. конф. Волгоград, 1998. 352 с.
8. Friflyander I.N., Senatorova O.G., Anihovckaya L.I., Sidelnikov V.V., Dementeva L.A., Startsev O.V. The Structure and Properties of СИАЛ (Glass/Epoxy – Aluminium) Laminates // *Proceedings of the 6th International Conference on Aluminum Alloys, ICAA-6*. Toyohashi, Japan, 1998. Vol. 3. P. 1957–1963.
9. Vlot A. Glare history of development of a new aircraft material. Kluwer Academic Publishers, 2001. 527 p.

10. Lin C.T., Kao P.W., Yang F.S. Fatigue behaviour of carbon fibre-reinforced aluminium laminates // *Composites*. 1991. No. 22 (2). P. 135–141.
11. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Ильичев А.В., Соловьева Н.А. Исследование механических характеристик слоистого металлополимерного композиционного материала на основе листов алюминия и слоев углепластика // *Вопросы материаловедения*. 2018. № 4 (96). С. 86–96.
12. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Соловьева Н.А. Влияние исходных компонентов на механические характеристики слоистого металлополимерного композиционного материала «алюминий–углепластик» // *Материаловедение*. 2017. № 5. С. 38–42.
13. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Павловская Т.Г., Волков И.А. Проблема контактной коррозии при создании слоистых металлополимерных композиционных материалов на основе алюминия и углепластика // *Вопросы материаловедения*. 2016. № 1 (85). С. 127–133.
14. Слоистый алюмокомпозит и изделие, выполненное из него: пат. 2600765 Рос. Федерация; заявл. 10.06.2015; опубл. 04.10.2016.
15. Зиченков М.Ч., Шаныгин А.Н. Гибридные авиаконструкции нового поколения для перспективных гражданских самолетов // *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*. 2018. № 11. С. 106–114.
16. Шестов В.В., Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н. Высокопрочный слоистый материал на основе листов из алюминий-литиевого сплава // *Технология легких сплавов*. 2016. № 1. С. 119–123.
17. Лавров А.В., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю., Автаев В.В. Оптимизация структуры гибридных композиционных материалов авиационного назначения // *Труды ВИАМ*. 2016. № 11 (47). С. 56–62. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-7-7.
18. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмокомпозиты СИАЛ-1441 и сотрудничество с «Airbus» и «TU Delft» // *Цветные металлы*. 2013. № 9. С. 50–53.
19. Антипов В.В. Научно-технологические основы разработки слоистых гибридных композиционных материалов типа СИАЛ с варьируемыми физико-механическими свойствами на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и композитов: дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 2021. 316 с.
20. Дуюнова В.А., Кутырев А.Е., Серебренникова Н.Ю., Вдовин А.И., Сомов А.В. Исследование воздействия агрессивных факторов внешней среды на развитие коррозионных поражений на образцах слоистого металлокомпозитного материала класса СИАЛ // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). С. 81–90. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.12.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.
21. Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Кан А.Ч., Соловьева Н.А. Исследование коррозионной стойкости гибридных слоистых металлополимерных материалов // *Труды ВИАМ*. 2024. № 8 (138). С. 38–47. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-38-47.
22. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Сенаторова О.Г., Морозова Л.В., Лукина Н.Ф., Нефедова Ю.Н. Гибридные слоистые материалы с небольшой скоростью развития усталостной трещины // *Вестник машиностроения*. 2016. № 12. С. 45–49.
23. Железина Г.Ф., Колобков А.С., Кулагина Г.С., Кан А.Ч. Демпфирующие свойства гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых, титановых сплавов и слоев композитов // *Труды ВИАМ*. 2021. № 2 (96). С. 10–19. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-10-19.
24. Антипов В.В., Зайцев М.Д., Родченко Т.С., Стойда Ю.М., Серебренникова Н.Ю., Сидельников В.В. Исследование долговечности конструктивно-подобного образца панели фюзеляжа с обшивкой из алюмокомпозитного материала СИАЛ // *Деформация и разрушение материалов*. 2021. № 3. С. 18–24.
25. Антипов В.В., Оглодков М.С., Селиванов А.А., Самохвалов С.В., Нефедова Ю.Н. Оценка стойкости слоистых алюмокомпозитов к ударным нагрузкам // *Вопросы материаловедения*. 2025. № 4 (124). С. 130–132.

26. 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.
27. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Исследование пожаростойкости слоистых гибридных алюмокомпозитов класса СИАЛ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 3. С. 36–41.
28. Антипов В.В., Коновалов А.Н., Серебренникова Н.Ю., Сомов А.В., Нефедова Ю.Н. Влияние структуры на огнестойкость и огнестойкость алюмокомпозитов класса СИАЛ и возможности применения данных материалов в авиационной технике // *Труды ВИАМ*. 2019. № 1 (73). С. 40–46. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-40-46.
29. СТО 1-595-20-532–2017. Оценка огнестойкости и огнестойкости материалов, предназначенных для пожароопасных зон в авиационной технике. М.: ФГУП «ВИАМ», 2017. 23 с.
30. Огнестойкий слоистый металлокерамический материал и изделие, выполненное из него; пат. 2676637 Рос. Федерация; заявл. 07.05.2018; опубл. 09.01.2019.
31. Roebroeks G.H.J.J. GLARE: a structural material for fire resistant fuselages // *AGARD Conference Proceedings*. North Atlantic treaty organization, 1996. P. 13–26.
32. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ерасов В.С., Каширин В.В. Гибридные слоистые материалы на базе алюминий-литиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 3 (42). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8.
33. Антипов В.В., Сомов А.В., Сидельников В.В., Нефедова Ю.Н., Огурцов П.С., Соловьев В.А. Технологические особенности формообразования огнестойкого легкого слоистого материала для изготовления капота двигателя вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). С. 90–100. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.12.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-90-100.
34. Способ соединения слоистого алюмокомпозита: пат. 2570469 Рос. Федерация; заявл. 10.09.14; опубл. 10.12.15.
35. Антипов В.В., Сидельников В.В., Самохвалов С.В., Нефедова Ю.Н., Сомов А.В. Способы соединения алюмокомпозитов методом сращивания для изготовления крупногабаритных обшивочных панелей самолета // *Вестник машиностроения*. 2022. № 11. С. 58–63.
36. Bucci R.J., Kulak M., Heinemann M.B. et al. Large Panel Validation of Advanced Metallic and Hybrid Structural Concepts for Next-Gen Transport Aircraft // *AeroMat 2007*. Baltimore, 2007. URL: <https://asm.confex.com/> (дата обращения: 01.12.2025).
37. Fredell R.S., Gunnink J.W., Bucci R.J., Hinrichsen J. «Care-free» hybrid wing structures for aging USAF transports: First International Conference on Damage Tolerance of Aircraft Structures. URL: https://www.researchgate.net/publication/228415487_Carefree_Hybrid_Wing_Structures_for_Aging_USAF_Transports (дата обращения: 01.12.2025).
38. Sinmazçelik T., Avcu E., Bora M.Ö., Çoban O. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods // *Materials and Design*. 2011. Vol. 32. P. 3671–3685.
39. Антипов В.В., Лавро Н.А., Сухоиваненко В.В., Сенаторова О.Г. Опыт применения Al–Li сплава 1441 и слоистого материала на его основе в гидросамолетах // *Цветные металлы*. 2013. № 8. С. 46–50.
40. 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.
41. 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.
42. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.

References

1. Laurens B.V. Development of a new hybrid material (ARALL) for aircraft structures. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1983, no. 22 (3), pp. 492–496.
2. Marissen R. Flight simulation behaviour of aramidreinforced aluminium laminates (ARALL). *Engineering Fracture Mechanics*, 1984, vol. 19, no. 2, pp. 261–277.
3. Zhelezina G.F., Shalin R.E., Perov B.V. et al. Layered metal-polymer composite alor. *Organoplastics in aviation products: appendix of Aviation Industry*. Moscow: Mashinostroenie, 1985, no. 2, pp. 9–12.
4. Schijve J. Crack stoppers and ARALL laminates. *Engineering Fracture Mechanics*, 1990, vol. 31, no. 2, pp. 405–421.
5. Voegesang L.B., Gunnink J.W. ARALL: A Materials Challenge for the next Generation of Aircraft. *Materials and Design*, 1986, vol. 7, no. 6, pp. 287–300.
6. Postnov V.I., Senatorova O.G., Zhelezina G.F., Kazakov I.A., Abramov P.A., Gerasimov V.A., Postnova M.V. Experience of using MPCM ALOR D16/41 in the nose section of the wing of the An-124-100 aircraft. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2009, no. 4 (13), pp. 8–17.
7. *Layered composite materials – 98: collection of works of the int. conf.* Volgograd, 1998, 352 p.
8. Friflyander I.N., Senatorova O.G., Anihovckaya L.I., Sidelnikov V.V., Dementeva L.A., Startsev O.V. The Structure and Properties of CIAЛ (Glass/Epoxy – Aluminium) Laminates. *Proceedings of the 6th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-6)*. Toyohashi, 1998, vol. 3, pp. 1957–1963.
9. Vlot A. *Glare history of development of a new aircraft material*. Kluwer Academic Publishers, 2001, 527 p.
10. Lin C.T., Kao P.W., Yang F.S. Fatigue behaviour of carbon fibre-reinforced aluminium laminates. *Composites*, 1991, no. 22 (2), pp. 135–141.
11. Voynov S.I., Zhelezina G.F., Ilyichev A.V., Solovieva N.A. Study of mechanical characteristics of layered metal-polymer composite material based on aluminum sheets and carbon fiber layers. *Voprosy materialovedeniya*, 2018, no. 4 (96), pp. 86–96.
12. Voynov S.I., Zhelezina G.F., Solovieva N.A. Influence of initial components on the mechanical characteristics of layered metal-polymer composite material «aluminum–carbon fiber». *Materialovedenie*, 2017, no. 5, pp. 38–42.
13. Voynov S.I., Zhelezina G.F., Pavlovskaya T.G., Volkov I.A. Problem of contact corrosion in the creation of layered metal-polymer composite materials based on aluminum and carbon fiber. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 1 (85), pp. 127–133.
14. *Laminated aluminum-fiberglass plastic and a product made therefrom: pat.* 2600765 Rus. Federation; appl. 10.06.15; publ. 04.10.16.
15. Zichenkov M.Ch., Shanygin A.N. New-generation hybrid aircraft structures for advanced civil aircraft. *Polet*, 2018, no. 11, pp. 106–114.
16. Shestov V.V., Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N. High-strength layered material based on aluminum-lithium alloy sheets. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2016, no. 1, pp. 119–123.
17. Lavrov A.V., Erasov V.S., Podzhivotov N.Yu., Avtaev V.V. Optimization of structure of hybrid composition materials for aircraft. *Trudy VIAM*, 2016, no. 11 (47), pp. 56–62. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 07, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-7-7.
18. Kablov E.N., Antipov V.V., Senatorova O.G. Layered aluminum-fiberglass plastics SIAL-1441 and cooperation with Airbus and TU Delft. *Tsvetnye metally*, 2013, no. 9, pp. 50–53.
19. Antipov V.V. *Scientific and technological foundations for the development of layered hybrid composite materials of the SIAL type with variable physical and mechanical properties based on sheets of aluminum-lithium alloys and fiberglass: thesis, Dr Sc. (Tech.)*. Samara, 2021, 316 p.
20. Duyunova V.A., Kuttyrev A.E., Serebrennikova N.Yu., Vdovin A.I., Somov A.V. Examination of the impact of aggressive environmental factors on the development of corrosion damage on samples of laminated glass-reinforced plastic of SIAL class. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 81–90. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.

21. Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Kan A.Ch., Solovyova N.A. Research of corrosion resistance of the hybrid layered metal polymeric materials. *Trudy VIAM*, 2024, no. 8 (138), pp. 38–47. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-38-47.
22. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Senatorova O.G., Morozova L.V., Lukina N.F., Nefedova Yu.N. Hybrid layered materials with a low rate of fatigue crack development. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2016, no. 12, pp. 45–49.
23. Zhelezina G.F., Kolobkov A.S., Kulagina G.S., Kan A.Ch. Damping properties of hybrid layered metal-polymer materials based on aluminum, titanium alloys and organoplastics layers. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), pp. 10–19. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-10-19.
24. Antipov V.V., Zaitsev M.D., Rodchenko T.S., Stoyda Yu.M., Serebrennikova N.Yu., Sidelnikov V.V. Study of the durability of a structurally similar sample of a fuselage panel with a skin made of SIAL aluminum-fiberglass plastic. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2021, no. 3, pp. 18–24.
25. Antipov V.V., Oglodkov M.S., Selivanov A.A., Samokhvalov S.V., Nefedova Yu.N. Evaluation of the resistance of laminated aluminum-fiberglass plastics to impact loads. *Voprosy materialovedeniya*, 2025, no. 4 (124), pp. 130–132.
26. 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, pp. 1784–1792.
27. Antipov V.V., Senatorova O.G., Sidelnikov V.V. Research of fire firmness layered hybrid aluminum fibreglasses of SIAL's class. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 3, pp. 36–41.
28. Antipov V.V., Konovalov A.N., Serebrennikova N.Yu., Somov A.V., Nefedova Yu.N. Influence of structure on fire resistance and fireproof FMLS SIAL-type and possibility of application of data of materials in aircraft industry. *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), pp. 40–46. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2025). DOI: 18577/2307-6046-2019-0-1-40-46.
29. Organization Standard 1-595-20-532–2017. *Assessment of fire resistance and fire impermeability of materials intended for fire-hazardous zones in aviation equipment*. Moscow: VIAM, 2017, 23 p.
30. *Fire-resistant laminated metal-fiberglass plastic and products made from it*: pat. 2676637 Rus. Federation; appl. 07.05.18; publ. 09.01.19.
31. Roebroeks G.H.J.J. GLARE: a structural material for fire resistant aircraft fuselages. *Aircraft Fire Safety, AGARD Conference Proceedings*, 1996, vol. 587, pp. 26-1–26-13.
32. Serebrennikova N.Yu., Antipov V.V., Senatorova O.G., Erasov V.S., Kashirin V.V. Hybrid multilayer materials based on aluminum-lithium alloys applied to panels of plane wing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 3 (42), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8.
33. Antipov V.V., Somov A.V., Sidelnikov V.V., Nefedova Yu.N., Ogurtsov P.S., Soloviev V.A. Technological features of shaping fire-resistant light laminated material for helicopter engine hood manufacturing. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 90–100. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-90-100.
34. *Method of joining laminated aluminum-fiberglass*: pat. 2570469 Rus. Federation; appl. 10.09.14; publ. 10.12.15.
35. Antipov V.V., Sidelnikov V.V., Samokhvalov S.V., Nefedova Yu.N., Somov A.V. Methods of joining aluminum-fiberglass by splicing for the manufacture of large-sized aircraft skin panels. *Vestnik mashinostroeniya*, 2022, no. 11, pp. 58–63.
36. Bucci R.J., Kulak M., Heinemann M.B. et al. Large Panel Validation of Advanced Metallic and Hybrid Structural Concepts for Next-Gen Transport Aircraft. *AeroMat 2007*. Baltimore, 2007. Available at: <https://asm.confex.com/> (accessed: December 01, 2025).
37. Fredell R.S., Gunnink J.W., Bucci R.J., Hinrichsen J. «Care-free» hybrid wing structures for aging USAF transports: First International Conference on Damage Tolerance of Aircraft Structures. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228415487_Carefree_Hybrid_Wing_Structures_for_Aging_USAF_Transports (accessed: December 01, 2025).

38. Sinmazçelik T., Avcu E., Bora M.Ö., Çoban O. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Materials and Design*, 2011, vol. 32, pp. 3671–3685.
39. Antipov V.V., Lavro N.A., Sukhoivanenko V.V., Senatorova O.G. Experience of using Al–Li alloy 1441 and layered material based on it in seaplanes. *Tsvetnyye metally*, 2013, no. 8, pp. 46–50.
40. Podzhivotov N.Yu., Kablov E.N., Antipov V.V. et al. Layered metal-polymer materials in aircraft structural elements. *Perspektivnye materialy*, 2016, no. 10, pp. 5–19.
41. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
42. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N., Nefedova Yu.N. Perspectives of application of fiber metal laminate materials based on aluminum alloys in aircraft design. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.

Информация об авторах

Антипов Владислав Валерьевич, генеральный директор, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», mail@crism.ru
Асташкин Александр Игоревич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Селиванов Андрей Аркадьевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Ткаченко Евгения Анатольевна, старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladislav V. Antipov, Director General, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – CRISM «Prometey», mail@crism.ru
Alexander I. Astashkin, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Andrey A. Selivanov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Evgenia A. Tkachenko, Senior Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 12.02.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.02.2026.
 The article was submitted 12.02.2026; approved and accepted for publication after reviewing 17.02.2026.