

УДК 669.018.95

В.В. Антипов<sup>1</sup>, Н.Ю. Серебренникова<sup>1</sup>, А.Н. Коновалов<sup>1</sup>, Ю.Н. Нефедова<sup>1</sup>

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53

*Приведены экспериментальные значения механических характеристик слоистых металлополимерных материалов на основе тонких листов из алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов и полимерных слоев, состоящих из клеевых связующих с высокопрочными высокомодульными армирующими волокнами (стеклянными, органическими, угольными). Показаны преимущества, возможности применения и недостатки каждого вида материалов: алюмоорганопластиков АЛОП, алюмоуглепластиков АЛКАР, алюмокомпозитов СИАЛ и их зарубежных аналогов ARALL, CARALL, GLARE.*

**Ключевые слова:** металлополимерные материалы, алюмокомпозит СИАЛ, алюмоорганопластик АЛОП, алюмоуглепластик АЛКАР, алюминий-литиевый сплав.

V.V. Antipov<sup>1</sup>, N.Yu. Serebrennikova<sup>1</sup>, A.N. Konovalov<sup>1</sup>, Yu.N. Nefedova<sup>1</sup>

## PERSPECTIVES OF APPLICATION OF FIBER METAL LAMINATE MATERIALS BASED ON ALUMINUM ALLOYS IN AIRCRAFT DESIGN

*The article presents the mechanical characteristics of fiber metal laminates based on thin sheets of aluminum and aluminum-lithium alloys and polymer layers consisting of adhesive binders with high-strength high-modulus reinforcing fibers (glass, organic, carbon). Advantages, possibilities of application and disadvantages of each type of materials are shown: ALOR aluminum organoplastics, ALKAR aluminum carbon plastic, SIAL aluminum glass plastic and their foreign analogues ARALL, CARALL and GLARE.*

**Keywords:** fiber metal laminates, hybrid material, aluminum fiber-glass material, Aramid Aluminum Laminate, Carbon Reinforced Aluminium Laminate, Al–Li alloy.

<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

Создание новых конструкций авиационной техники тесно связано с эволюцией материалов и технологий их производства. Повышение эффективности разрабатываемых конструкций определяется увеличением не только удельной прочности материалов, но и комплекса других эксплуатационных характеристик: трещиностойкости, сопротивления усталости, коррозионной стойкости, обеспечивающих надежность и безопасность эксплуатации изделий [1, 2].

В настоящее время полуфабрикаты из алюминиевых сплавов широко используются в планере летательных аппаратов, актуальной задачей является разработка слоистых металлополимерных материалов, обладающих широким диапазоном свойств, на основе алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов для

применения в авиационных конструкциях [3, 4]. Эти композиционные материалы представляют собой конструируемые гибридные листовые материалы с чередованием металлических слоев – листов из алюминиевых конструкционных сплавов (алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности 1441 и В-1469, дюралюминов 1163 и Д16ч., высокопрочных сплавов В95п.ч., В95о.ч.) и находящихся между ними слоев полимерных составляющих. Полимерная составляющая гибридного материала в обязательном порядке армирована соответствующим типом высокопрочных высокомодульных волокон (стеклянных, углеродных или органических).

По сравнению с монолитными алюминиевыми листами современные отечественные слоистые металлополимерные материалы имеют чрезвычайно высокое сопротивление

развитию усталостных трещин (более чем в 5 раз), больший уровень статической прочности ( $\sigma_B$  – от 600–650 МПа для равнопрочных СИАЛ-3-1 и до 900–1200 МПа для однонаправленных СИАЛ-1-1) и пониженную плотность ( $d=2350\text{--}2400$  кг/м<sup>3</sup>). Благодаря применению слоистых металлополимерных материалов обеспечивается снижение массы конструкции, повышается ресурс и увеличивается межремонтный период [5].

Слоистые металлополимерные композиционные материалы являются новым семейством конструктивных гибридных листовых материалов, предназначенных для использования в конструкциях летательных аппаратов. По результатам научно-исследовательских работ выявлены преимущества и недостатки каждого типа материалов.

К настоящему времени наиболее исследованными и нашедшими практическое применение в конструкции планера самолетов и вертолетов являются слоистые металлополимерные материалы типа СИАЛ на основе листов из алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов [6] и зарубежные аналоги типа GLARE на основе алюминиевых листов ввиду их преимуществ по прочностным [7–9], усталостным и весовым характеристикам перед монолитными конструкциями из традиционных алюминиевых сплавов. Имеется опыт изготовления конструктивно-подобных образцов (КПО) и деталей с использованием обшивки из слоистых материалов типа СИАЛ и силового набора профилей из алюминий-литиевых сплавов.

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») [10].

### Материалы и методы

Экспериментальные значения механических характеристик слоистых металлополимерных материалов на основе тонких листов из алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов получены на стандартных образцах.

Испытания КПО на сжатие и усталость проводили на испытательных машинах таким образом, чтобы центр жесткости сечения, приведенного по модулю упругости, совпадал с центральной силовой линией приложения нагрузки (плит) испытательной машины (верхняя плита снабжена регулируемой шарнирной опорой).

### Результаты и обсуждение

В России с 1970-х годов ведутся работы по разработке и исследованию слоистых металлополимерных материалов с использованием алюминиевых листов и полимерных слоев с высокопрочными высокомодульными армирующими волокнами.

Во ФГУП «ВИАМ» разрабатывались одни из первых металлополимерных слоистых материалов с использованием алюминиевых листов – алюмоорганопластики АЛОРы (АЛюминий + ОРганопластик), которые, также как и зарубежные аналоги ARALL (ARamid ALuminium Laminate), содержали прослойки пластика с армирующими органическими волокнами [11, 12].

Слоистые материалы АЛОРы разработаны с целью повышения ресурсных характеристик: снижения скорости роста усталостных трещин (в 5–20 раз), повышения усталостной долговечности (более чем в 1,2 раза), прочности и стойкости к ударным воздействиям по сравнению с конструкцией из алюминиевых сплавов (табл. 1) [11, 12].

Результаты длительных климатических испытаний в условиях теплого влажного

Таблица 1

Сравнение значений механических свойств АЛОРов и листов из алюминиевого сплава Д16ч.-АТ

Свойства	Значения свойств для		
	ортотропно-армированного материала АЛОР Д16/41	однонаправленного материала АЛОР Д16/41Н	листа из алюминиевого сплава Д16ч.-АТ
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2350	2250	2780
Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МПа	450	700	415
Предел текучести при растяжении $\sigma_{0,2}$ , МПа	350	500	275
Модуль упругости при растяжении $E$ , ГПа	62	69	72
Малоцикловая усталость (МЦУ) (при $\sigma_{max}=157$ МПа): $N$ , цикл	120	Более 200	120
Скорость роста трещины усталости (СРТУ): $d//dN$ (при $\Delta K=31$ МПа $\sqrt{м}$ ), мм/цикл	0,2	0,1	2,0
Примечание. Слоистые композиты АЛОР Д16/41 и АЛОР Д16/41Н состоят из трех листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ толщиной 0,5 мм и двух слоев органопластика толщиной 0,15 мм, армированного арамидными волокнами СВМ.			



Рис. 1. Конструктивно-подобный образец носовой части крыла самолета Ан-124 с обшивками из АЛОРа Д16/41 [11, 12]

климата на образцах из АЛОРов с герметизированными торцевыми поверхностями показали высокую стойкость к воздействию климатических факторов, которая аналогична стойкости конструкций из листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ.

Специалисты конструкторского бюро КБ «Антонов» впервые применили листовой материал АЛОР для изготовления обшивок передней кромки крыла самолета Ан-124, подвергающихся воздействию вибро- и акустических нагрузок (рис. 1). Помимо увеличения ресурса за счет использования АЛОРов взамен алюминиевого сплава Д16ч.-АТ получено снижение скорости роста усталостных трещин до 10 раз, связанное с торможением развития трещин по сечению материала арамидными волокнами. При этом достигнуто снижение массы КПО до 10–15% по сравнению с КПО из сплава Д16ч.-АТ [12].

Зарубежный слоистый волокнистый композиционный материал ARALL создан в 1978 г. в Дельфтском технологическом университете (Нидерланды). Материал ARALL состоит из тонкого алюминиевого листа толщиной  $0,2 \pm 0,4$  мм и однонаправленного или перекрестного препрега с органическими волокнами.

С учетом различных свойств алюминиевых сплавов существуют два вида материала ARALL: ARALL-7075 – на базе листов из высокопрочного алюминиевого сплава 7075Т6 и ARALL-2024 – на базе листов из ресурсного алюминиевого сплава 2024Т3.

В табл. 2 приведены значения механических свойств различных материалов [13–15].

Опробование применения нового аллоорганопластика ARALL проведено компанией Fokker (рис. 2) [16].

Таблица 2

Сравнение значений механических свойств материалов ARALL и алюминиевых сплавов

Свойства	Значения свойств для			
	материала ARALL		алюминиевого сплава	
	ARALL-7075	ARALL-2024	7075Т6	2024Т3
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2350	2450	2810	2780
Предел прочности при растяжении $\sigma_b$ , МПа	735	590	560	470
Предел текучести при растяжении $\sigma_{0,2}$ , МПа	635	380	480	360
Предел текучести при сжатии $\sigma_{0,2сж}$ , МПа	355	255	480	270
Модуль упругости при растяжении $E$ , ГПа	69	70	72	72
Относительное удлинение $\delta$ , %	1,9	2,4	11	17



Рис. 2. Панель крыла из материала ARALL для самолета F-27 компании Fokker

По результатам научно-исследовательских работ и испытаний образцов и конструктивно-подобных элементов выявлены недостатки материалов АЛОП и АРАЛЛ, которые явились ограничением для их использования в авиастроении:

- сложности при обработке резанием из-за высоких прочностных свойств и вязкости разрушения арамидных волокон;
- пониженное сопротивление сжатию при статическом нагружении вследствие разрушения арамидных волокон;
- повышенная адсорбция влаги органическими волокнами, которая может привести к коррозионному поражению алюминиевых листов в случае отсутствия или нарушения герметизации торцевых поверхностей;
- высокая стоимость органических волокон.

За рубежом различные типы алюмоорганических композитов в результате опытного опробования и испытания на стандартных и конструктивно-подобных образцах материала АРАЛЛ на основе полимерных композиционных материалов (ПКМ) с термореактивными и термопластичными матрицами применительно к листовым полуфабрикатам для обшивки фюзеляжа, закрылков, панелей крыла самолетов компаний Fokker (F-27 и F-100) и Boeing (C-17 и C-130) не нашли дальнейшего внедрения из-за ряда отмеченных ранее недостатков [16].

Углеродные волокна, имеющие малую плотность (~1,4 г/см<sup>3</sup>) и высокий модуль упругости (~140 ГПа), опробованы в качестве наполнителя полимерных прослоек слоистых материалов. Работы по созданию и исследованию слоистых металлополимерных материалов на основе углеродных волокон (алюмоуглепластики) проводили в различных странах:

- в России – АЛКАР (АЛюминий+КАРбон) [17, 18] – разработчик ФГУП «ВИАМ»;
- за рубежом – CARALL (Carbon Reinforced Aluminium Laminate) – разработчики нидерландский Delft University of Technology и австралийский University of Sydney [19–21].

Алюмоуглепластики состоят из чередующихся листов алюминиевого сплава и препрега на основе углеродных волокон, а также промежуточных слоев стеклопластика, исключающих возможность появления контактной коррозии (рис. 3). Свойства алюмоуглепластиков зависят от прочностных характеристик слоев – направления и схем укладки алюминиевых листов и углепластика. Разработанный во ФГУП «ВИАМ» алюмоуглепластик АЛКАР Д16/14-3 имеет следующий уровень значений механических характеристик:  $E=87\text{--}93$  ГПа,  $\sigma_B=860\text{--}900$  МПа,  $\sigma_{сж}=690\text{--}720$  МПа. Материал предназначен

для элементов силовых конструкций перспективных самолетов взамен высокопрочных алюминиевых сплавов и ПКМ [22, 23].

Основной проблемой при создании материалов системы «алюминий–углепластик» является исключение их непосредственного контакта, вызывающего гальваническую коррозию за счет разности электрических потенциалов алюминиевого листа и слоя углепластика, в том числе в зонах постановки крепежа, а также повышенные остаточные напряжения гибридного материала, появляющиеся при технологических нагревах при склеивании и полимеризации препрегов вследствие различия в значениях температурных коэффициентов линейного расширения углепластика и алюминиевого сплава. Наличие остаточных внутренних напряжений у алюмоуглепластиков приводит к снижению значений статической прочности и сопротивления усталости.

Результаты исследовательских работ нашли отражение в научно-технической литературе [17–24]. Однако не найдено окончательное решение гарантированного исключения гальванического контакта в зонах постановки крепежа из-за технологических процессов, связанных со сборкой конструкции и подгоночными работами, с появлением незащищенных поверхностей по толщине материала.

Начиная с конца 1980-х годов исследовательские работы по разработке и испытаниям металлополимерных композиционных материалов были сосредоточены на слоистых материалах второго поколения: алюмокомпозитах СИАЛ (Стеклопластик И АЛюминий) – в России [25–29] и GLARE (Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy) – в Европе и США [30–33]. В этих материалах в качестве прослоек пластика используют клеевые препреги, армированные высокопрочными стеклонаполнителями.

Алюмокомпозиты представляют собой листовую конструктивную материал слоистой структуры с чередованием листов алюминиевых сплавов (0,3–0,5 мм) и прослоек стеклопластика (0,2–0,5 мм) на основе клеевых препрегов, армированных высокопрочными

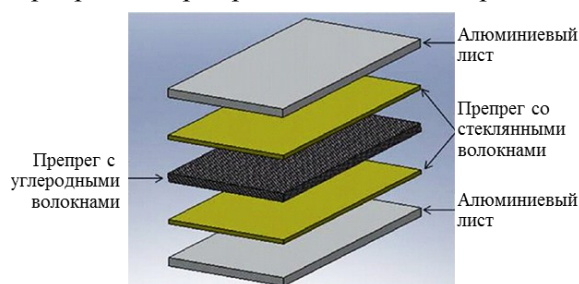


Рис. 3. Структура алюмоуглепластика [24]

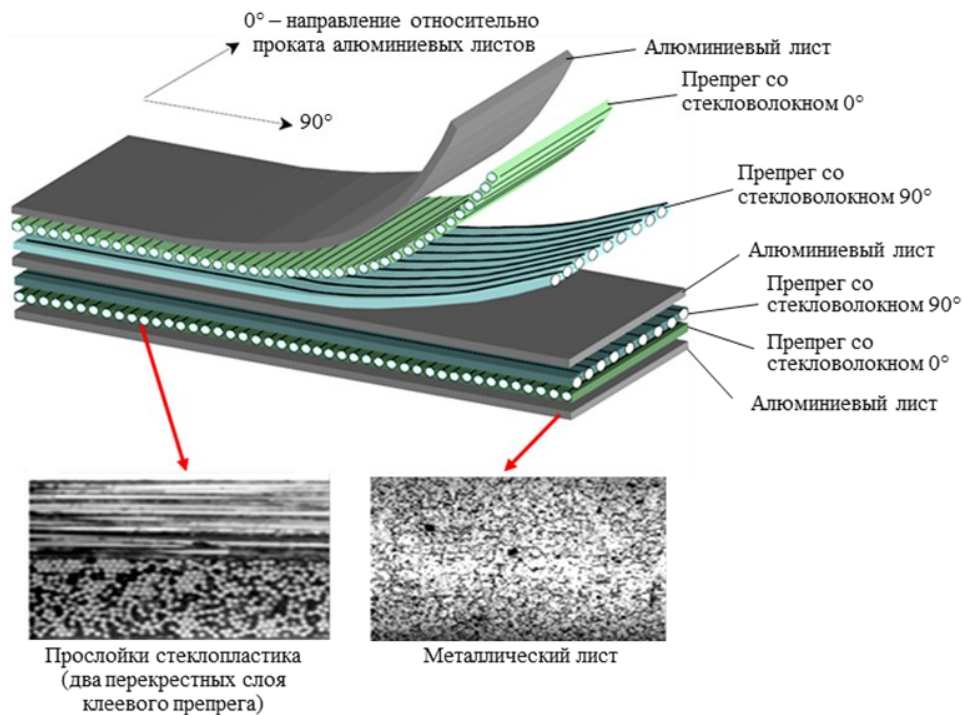


Рис. 4. Схема пятислойного алюмокомпозита

стеклонаполнителями. Обязательным условием при конструировании алюмокомпозитов является требование нечетного общего количества слоев по всем сечениям конструкции детали при расположении алюминиевых листов на внешней поверхности материала.

Схематично пятислойная 3/2 структура алюмокомпозита (3 алюминиевых листа + 2 прослойки стеклопластика) представлена на рис. 4. Прослойки стеклопластика

состоят, как правило, из нескольких монослоев клевого препрега. Расположение и количество монослоев определяется прочностными требованиями и конструкцией детали.

В табл. 3 приведены сравнительные характеристики алюмокомпозитов с различными схемами выкладки и листов из традиционного алюминиевого среднепрочного сплава марки 1163 [34].

Применение всего 3% (от общей массы) материала GLARE в самолете А-380 взамен

Таблица 3

Значение свойств СИАЛов в сравнении со свойствами листов из сплава марки 1163-Т

Свойства	Направление прокатки	Значения свойств для		
		СИАЛа со структурой		листа из сплава марки 1163-Т
		равнопрочной (близкой к изотропной)	однонаправленной (анизотропной)	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	П, Д	2350–2400		2780
Предел прочности при растяжении $\sigma_b$ , МПа	Д	600–650	900–1200	420
	П		250–300	
Скорость роста трещины усталости (СРТУ): $d/dN$ (при $\Delta K=31 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ ), мм/цикл (средние значения)	ДП	0,04–0,05		0,6–2,5
Малоцикловая усталость (МЦУ) (при $\sigma_{\max}=157 \text{ МПа}$ ): $N$ , цикл (средние значения)	Д	150–250		110

традиционных алюминиевых сплавов, например в обшивке фюзеляжа (рис. 5), позволило добиться весовой эффективности более 500 кг [32, 33].

Применение слоистых гибридных материалов типа СИАЛ для изготовления КПО авиационных деталей позволяет уменьшить массу конструкций на 10–15% [35, 36].

Сотрудниками ФГУП «ВИАМ» разработаны алюмокомпозиты применительно к типовым конструкциям деталей планера самолета с учетом конструктивно-технологических требований.

Разработка гибридных слоистых материалов ведется с применением компьютерного моделирования, что позволяет многократно сократить время и затраты на разработку материалов по сравнению с методами, основанными на анализе экспериментальных данных после проведения натурных испытаний.

Методом автоклавного формообразования изготовлен КПО панели фюзеляжа с обшивкой из алюмокомпозита СИАЛ-3-1Р пятислойной структуры суммарной толщиной ~1,5 мм и стрингерным набором из профилей из листов сплава 1441 (рис. 6). Результаты испытаний панелей на малоцикловую усталость показали преимущество панелей с обшивкой из материала типа СИАЛ ( $N_{разр}=300$  цикл) в сравнении с панелями с обшивкой из листов сплава 1163-Т ( $N_{разр}=160$  цикл).



Рис. 5. Обшивка фюзеляжа из материала GLARE

По результатам испытаний КПО с использованием слоистых гибридных материалов подтверждена эффективность их применения в зонах элементов конструкций, работающих не только на растяжение, но и длительно – в условиях сжатия. Разработан и изготовлен с проведением всесторонних испытаний фрагмент прототипа гибридной панели центроплана (рис. 7). Благодаря своей многослойной структуре, строению и характеристикам исходных компонентов слоистые гибридные панели для обшивок крыла на базе листов разной толщины из алюминий-литиевых сплавов и композитов обладают преимуществами перед монолитными панелями из алюминиевых сплавов В950.ч.-Т2 и 1163-Т: весовой эффективностью – до 15% от

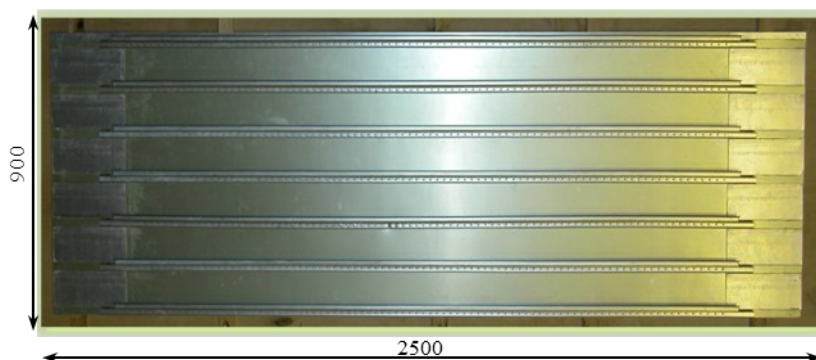
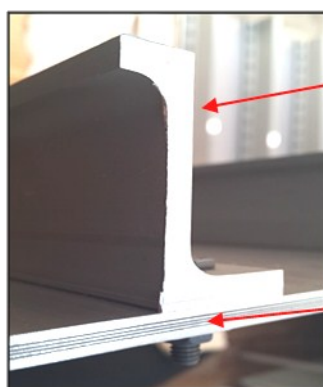


Рис. 6. Конструктивно-подобный образец панели фюзеляжа с обшивкой из алюмокомпозита СИАЛ-3-1Р и стрингерным набором из сплава 1441



Стрингер из Al-Li-сплава

Гибридная обшивка

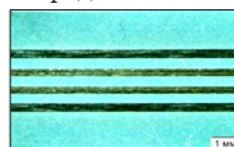


Рис. 7. Конструктивно-подобный образец гибридной панели крыла с обшивкой из слоистого материала на базе листов из алюминий-литиевых сплавов и композитов



Рис. 8. Конструктивно-подобный образец фрагмента обшивки нижней панели крыла из гибридного материала

массы агрегата, сопротивлением скорости роста трещины усталости – более чем в 10 раз и увеличением несущей способности элементов конструкции при сжатии – до 20% [37].

Дополнительным достоинством слоистых гибридных материалов является возможность изготовления конструкций сложной конфигурации с минимальной механической обработкой заготовки. С применением листов из алюминий-литиевого сплава 1441 различной толщины и клеевого препрега методом автоклавного формования изготовлен фрагмент нижней обшивки крыла из гибридного материала (рис. 8). Данный фрагмент нижней обшивки крыла имеет сложную криволинейную конфигурацию и переменную толщину – от 2,3 до 13,0 мм. Особенностью конструкции обшивки нижней панели из гибридного слоистого материала является использование в структуре слоев из листовых материалов разных толщин и их укладки по схеме, специально разработанной для обеспечения геометрических параметров согласно чертежу, с учетом местных утолщений обшивки панелей в зонах под «люки–лазы».

По результатам испытаний образцов, изготовленных из фрагмента нижней обшивки крыла, предел прочности при растяжении более чем в 2 раза больше по сравнению с пределом прочности аналога – образцов фрагмента обшивки крыла из монолитного листа алюминиевого сплава 1163-Г, скорость роста трещины усталости меньше в 10 раз, предел текучести больше на 30%, а плотность меньше на 15%.

### Заключения

Решение вопросов повышения весовой эффективности конструкций изделий авиаци-

онной техники нового поколения невозможно без применения принципиально новых материалов. При этом необходимо как внедрять новые конструкционные материалы, обладающие улучшенным комплексом свойств по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами, так и применять прогрессивные технологии их производства и переработки.

Анализ мировых тенденций развития показывает, что за рубежом и в России активно ведутся работы в области создания слоистых металлополимерных композиционных материалов.

При разработке гибридных слоистых материалов применяется компьютерное моделирование, что позволяет проектировать слоистые структуры, отвечающие необходимым конструктивно-технологическим требованиям для применения в изделиях авиационной техники.

Высокие значения характеристик различных слоистых металлополимерных композиционных материалов создают перспективу их применения для снижения массы, повышения ресурса и живучести авиационных конструкций, особенно подверженных усталостному нагружению – обшивок фюзеляжа, хвостового оперения планера, панелей крыла.

Следует отметить, что применение разработанных во ФГУП «ВИАМ» новых слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов позволит решить актуальные научно-технические задачи отрасли по повышению весовой эффективности авиационных конструкций, в том числе и особо ответственных деталей, таких как обшивки фюзеляжа и панелей крыла, с одновременным повышением их трещиностойкости и усталостной долговечности.

### Библиографический список

1. Бецофен С.Я., Антипов В.В., Князев М.И. Сплавы систем Al–Cu–Li и Al–Mg–Li: фазовый состав, текстура и анизотропия механических свойств (обзор) // Деформация и разрушение материалов. 2015. №11. С. 10–26.
2. Lynch S.P., Wanhill R.J., Byrnes R.T., Bray G.H. Fracture toughness and fracture modes of aerospace aluminum-lithium alloys // Alluminum-lithium alloys. Processing, properties and applications. Elsevier Inc., 2014. P. 416–456.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: Продолжение пути // Наука в России. 2012. №11. С. 16–21.

4. Гуняев Г.М., Железина Г.Ф., Ильченко С.И. Слоистые металлополимерные композиты на основе алюминиевых и титановых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. Вып.: Полимерные композиционные материалы. С. 50–58.
5. Фридляндер И.Н., Колобнев Н.И., Сандлер В.С. Алюминий-литиевые сплавы // *Машиностроение: энциклопедия в 40 т. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / под ред. И.Н. Фридляндера, Е.Н. Каблова. С. 156–185.*
6. Podzhivotov N.Y., Kablov E.N., Antipov V.V., Erasov V.S., Serebrennikova N.Y., Abdullin M.R., Limonin M.V. Laminated metal-polymeric materials in structural elements of aircraft // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Vol. 8 (2). P. 211–221. DOI: 10.1134/S2075113317020198.
7. *Fibre Metal Laminates / ed. by A. Vlot, J.W. Gunnik. Academic Publishers, 2001. P. 527.*
8. Gunnink J.W., Vlot A., De Vries T.J., Van Der Hoeven W. GLARE technology development 1997–2000 // *Applied Composite Materials*. 2002. Vol. 9. Issue 4. P. 201–219.
9. Gunnink J.W. Hybrid Structures, The New Standard for Advanced Primary Aircraft Structures // *AeroMat 2007: 25 Years of Aerospace Evolution: Materials, Design, Manufacturing, Certification (Baltimore, June 25–28, 2007)*. 2007. P. 10.
10. 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.
11. Постнов В.И., Сенаторова О.Г., Каримова С.А., Павловская Т.Г., Железина Г.Ф., Казаков И.А., Абрамов П.А., Постнова М.В., Котов О.Е. Особенности формования крупногабаритных листов металлополимерных КМ, их структура и свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. №4. С. 23–32.
12. Постнов В.И., Сенаторова О.Г., Железина Г.Ф., Казаков И.А., Абрамов П.А., Герасимов В.А., Постнова М.В. Опыт применения МПКМ АЛОР Д16/41 в носовой части крыла самолета Ан-124-100 // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. №4. С. 8–17.
13. Beumler Th. Flying GLARE: thesis, PhD. Delft University of Technology, 2004. 460 p.
14. Schijve J. Crack stoppers and ARALL laminates // *Engineering Fracture Mechanics*. 1990. Vol. 31. No. 2. P. 405–421.
15. Teply J.L., Barbero E.J., Reddy J.N. Bending, vibration and stability of ARALL® laminates using a generalized laminate plate theory // *International Journal of Solids Structures*. 1991. Vol. 27. No. 5. P. 585–599.
16. Vlot A. Glare history of development of a new aircraft material. Kluwer Academic Publishers, 2001. P. 222.
17. 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.
18. 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.
19. Wang W.X., Takao Y., Matsubara T. Galvanic corrosion-resistant carbon fiber metal laminates // *16th International Conference on Composite Materials*. 2007. P. 10.
20. Lin C.T., Kao P.W., Yang F.S. Fatigue behaviour of carbon fibre-reinforced aluminium laminates // *Composites*. 1991. Vol. 22. Issue 2. P. 135–141.
21. Almeida R.S., Damato C.A., Botelho E.C. et al. Effect of surface treatment on fatigue behavior of metal/carbon fiber laminates // *Journal of Materials Science*. 2008. No. 43. P. 3173–3179.
22. 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.
23. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Волков И.А., Соловьева Н.А. Ингибиторы коррозии в составе слоистого металлополимерного композиционного материала на основе алюминия и углепластика // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2017. №4 (52). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-6-6.
24. Marissen R. Flight simulation behaviour of aramidreinforced aluminium laminates (ARALL) // *Engineering Fracture Mechanics*. 1984. Vol. 19. No. 2. P. 261–277.
25. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Котова Е.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Клеевые препреги и композиционные и слоистые алюмополимерные материалы на их основе // *Русский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 53–56.
26. Фридляндер И.Н., Аниховская Л.И., Сенаторова О.Г. и др. Клееные металлические и слоистые композиты // *Машиностроение: энциклопедия в 40 т. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / под ред. И.Н. Фридляндера, Е.Н. Каблова. С. 814–832.*



27. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 174–184.
28. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. Расчет на прочность гибридной панели крыла на базе листов и профилей из высокопрочного алюминий-литиевого сплава и слоистого алюмокомпозита // Авиационные материалы и технологии. 2016. №1 (40). С. 53–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-53-61.
29. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. №7. С. 24–29.
30. Vlot A., Grunnink J.W. Fibre Metal Laminates an introduction. Kluwer Academic Publishers, 2001. P. 527.
31. Parka S.Y., Choi W.J., Choi C.H., Choi H.S. Effect of drilling parameters on hole quality and delamination of hybrid GLARE laminate // Composite Structures. 2018. Vol. 185. P. 684–698.
32. Borgonje B., Ypma M.S. Long term behaviour of GLARE // Applied Composite Materials. 2003. No. 10. P. 243–255.
33. Heinimann M., Bucci R., Kulak M., Garratt M. Improving damage tolerance of aircraft structures through the use of selective reinforcement // Proceedings of the 23rd Symposium of International Committee on Aeronautical Fatigue. 2005. P. 197–208.
34. Конструкционные и жаропрочные сплавы системы Al–Cu–Mn // Машиностроение: энциклопедия в 40 т. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Сплавы типа дуралюмин / под ред. И.Н. Фридляндера, Е.Н. Каблова. С. 57–76.
35. Дуюнова В.А., Нечайкина Т.А., Оглодков М.С., Яковлев А.Л., Леонов А.А. Перспективные разработки в области легких материалов для современной авиакосмической техники // Технология легких сплавов. 2018. №4. С. 28–43.
36. 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: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №1 (73). Ст. 05. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 17.06.2019). DOI: 18577/2307-6046-2019-0-1-40-46.
37. Подживотов Н.Ю., Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю. и др. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов // Перспективные материалы. 2016. №10. С. 5–19.