

УДК 620.1:669.018.95

А.Р. Акмеев¹, И.Н. Гуляев¹, А.В. Ильичев¹, Н.В. Иванов¹**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
МЕТАЛЛОКОМПОЗИТА (АЛЮМИНИЙ–УГЛЕПЛАСТИК)
С АДАПТИВНОЙ СХЕМОЙ АРМИРОВАНИЯ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-43-49

Проведены исследования механических характеристик самоадаптирующегося металлокомпозиата на основе алюминия и углепластика. Рассмотрены различные схемы армирования (ориентации укладки армирующего наполнителя – углепластика) и их влияние на упруго-прочностные свойства металлокомпозиата. Проведены также испытания, имитирующие сложноподвиженное состояние образцов с различным порядком и структурой армирования металлокомпозиционного материала.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных направлений: 4. «Интеллектуальные, адаптивные материалы и покрытия» и 6. «Слоистые металлополимерные, биметаллические и гибридные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: металлокомпозиат, углепластик, алюминий, полимерный композиционный материал, механические испытания.

Researches of mechanical characteristics of «self-adapting» metal composite based on aluminum and carbon fiber-reinforced polymer are given in this work. Different reinforcement schemes (orientation of laying of reinforcing filler – carbon fiber-reinforced polymer) and their influence on elastic and strength properties of metal composite are considered. Tests simulating the complex stress state of samples with different order and structure of reinforcement of metal composite material are also carried out.

Work is executed within the implementation of the complex scientific directions: 4. «Smart, adaptive materials and coatings» and 6. «Multilayer metal polymer, bimetallic and hybrid materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: metal composite, carbon fiber-reinforced polymer, aluminum, polymer composite material, mechanical tests.

¹Федеральное 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

Постоянно актуальная техническая проблема при эксплуатации пассажирских, транспортных и спортивных самолетов – снижение массы и повышение безопасности полетов. Принципиально новое решение этой проблемы – создание материалов интеллектуального типа, способных адаптироваться к нагрузкам, обеспечивая при этом саморазгрузку ответственных силовых конструкций и сохранение их работоспособности в критических ситуациях. В передовых странах мира создание интеллектуальных материалов считается приоритетной задачей материаловедения, от решения которой зависит конструкторско-технологический облик и технические характеристики изделий техники будущего [1–3]. В России данное материаловедческое направление нашло отражение в создании адаптирующийся углепластиков для концевой части крыла истребителя Су-47 «Беркут» ОАО

«ОКБ Сухого», что обеспечило существенное повышение аэродинамических характеристик и маневренности самолета [4, 5]. Дополнительно такие материалы могут содержать и другие элементы интеллектуального типа – например, датчики и сенсоры или актюаторы [6].

В данной статье приведены результаты исследования механических свойств разработанного интеллектуального слоистого композита системы «алюминий–углепластик», способного к самоадаптации при нагружении и не уступающего по уровню конструкционных свойств лучшим отечественным и зарубежным композиционным материалам, используемым в ответственных силовых конструкциях летательных аппаратов [7–9].

Материалы и методы

В ходе работы выбрана принципиальная структура слоистого композита системы «алюминий–углепластик» с необходимым уровнем конструкционных характеристик и эффектом адаптации, а

также исследованы механические свойства при нагружении образцов адаптирующегося металлополимерного композита.

Целесообразность использования металлопластиков в качестве базового материала для создания конструкционных материалов интеллектуального типа подтверждается не только их уникальным комплексом свойств, но и возможностью широкого варьирования состава и структуры [9–12].

Наиболее приемлемым способом придания слоистому металлополимерному композиту свойств самоадаптивности является введение в его состав ориентированных под некоторым углом к главным осям анизотропии слоев высокомодульных и высокопрочных полимерных композитов (углепластиков), модуль упругости которых в 2 раза выше, чем у алюминиевых сплавов [13].

Основная область применения самоадаптирующихся металлополимерных композитов – это конструкции балочного типа – например, такие как крыло самолета.

При нагружении такого крыла или его концевой части аэродинамическими силами и моментами происходит изгиб и кручение всего крыла. Однако, вследствие несимметричности (несбалансированности) структуры композиционного материала в панелях концевой части кессона, возникающие в них нормальные напряжения «растяжения–сжатия» вызывают появление касательных напряжений, что в свою очередь проявляется в дополнительной закрутке. При этом изменяется угол атаки крыла относительно набегающего аэродинамического потока и происходит перераспределение аэродинамических сил, действующих на

крыло таким образом, что подъемная сила, действующая на концевую часть крыла, уменьшается, вызывая уменьшение изгибающего момента, действующего на крыло в целом, и разгрузку его корневой части. Этот эффект саморазгрузки или самоадаптации крыла происходит автоматически по мере возрастания действующих сил и моментов – особенно при перегрузках, связанных с маневрами, выполняемыми летательным аппаратом, и может быть реализован либо в снижении массы крыла, либо в увеличении коэффициента безопасности конструкции, что проявляется в повышении надежности летательного аппарата. По мере уменьшения действующей нагрузки, крыло возвращается к первоначальной форме [14, 15].

На рис. 1 приведена схема такого пятислойного листового металлополимерного композита «алюминий–углепластик». Между углепластиком (УП) и алюминием дополнительно закладывался слой стеклопластика, выполняющего роль антикоррозионного диэлектрического слоя [16]:

– суммарная толщина металлических слоев:

$$\delta_{Al} = \delta_{Al_1} + \delta_{Al_2};$$

– толщина слоя углепластика:

$$\delta_{УП\phi} = \delta_{УП1\phi} + \delta_{УП2\phi} + \delta_{УП90\phi}.$$

Формование металлокомпозита осуществляли методом прямого прессования. Пресс-форму с собранной заготовкой помещали в холодный пресс и подавали контактное давление. Затем пресс разогревали и ступенчато поднимали давление в соответствии с технологическим режимом.

Сочетание слоев алюминиевого сплава и углепластика позволяет получить слоистый металлополимерный композит с широким диапазоном упруго-прочностных свойств и

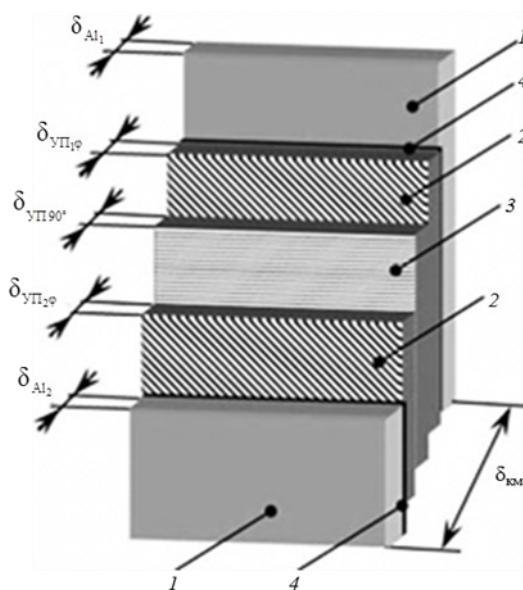


Рис. 1. Схема пятислойного металлополимерного композита «алюминий–углепластик»:

1 – слои алюминиевого сплава; 2 – слои углепластика с ориентацией волокон 10–30 град по отношению к главной оси; 3 – слой углепластика с ориентацией волокон 90 град по отношению к главной оси; 4 – адгезионно-антикоррозионные слои

Таблица 1

Состав и свойства компонентов образцов металлокомпозита

Условный номер образца	Объемное содержание слоев сплава Д16ч.-АТ*, отн. ед.	Характеристики слоя углепластика				
		Толщина, мм	Схема армирования	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Предел прочности при сжатии, МПа
1	0,58	0,59	[0] ₃	1430	126	–
2	0,43	1,10	[0] ₅	1430	126	–
3	0,43	1,12	[0/0/90/0/0]	1050	102	865
4	0,58	0,59	[0/90/0]	1080	95	–
5	0,43	1,12	[90/90/0/90/90]	290	29,5	–

* В составе металлокомпозита использовали два слоя алюминиевого сплава Д16ч.-АТ толщиной 0,41 мм с пределом прочности при растяжении 395 МПа и модулем упругости 78 ГПа.

оптимизировать его структуру под заданные технические требования путем подбора исходных слоев с теми или иными характеристиками, выбора их объемного соотношения и ориентации относительно друг друга.

В ходе разработки металлокомпозита выбран принципиальный состав и структура и предложены инженерные формулы для расчета его основных механических свойств. Проведены также экспериментальные исследования механических свойств металлокомпозита при растяжении в зависимости от структуры пакета, толщины слоев углепластика и расположения армирующих волокон.

Результаты и обсуждение

Состав и структура исследованных вариантов слоистого металлокомпозита представлены в табл. 1. В образцах слоистого металлокомпозита использовали два слоя алюминиевого сплава Д16ч.-АТ и варьировали объемное соотношение металла и углепластика, схему укладки и уровень прочности слоя углепластика (от 290 до 1427 МПа).

Для образцов 1 и 2 значения упруго-прочностных характеристик оказались идентичными, что вполне закономерно. Слои углепластика ориентированы вдоль оси приложения растягивающего усилия к образцу, они несут

основную прочностную нагрузку, в то время как металл преодолевает предел текучести начинается процесс его пластической деформации. Таким образом, определяющую роль в предельном напряженном состоянии образца при растяжении несут именно слои углепластика.

Особенности механического поведения металлокомпозита при статическом растяжении по сравнению с алюминиевым сплавом выявляются при сопоставлении их диаграмм деформирования (рис. 2). Предельная деформация при растяжении металлокомпозита зависит от деформации слоя углепластика и составляет 1,5%, что значительно меньше, чем у алюминиевого сплава. На диаграмме деформирования композита «алюминий–углепластик», также как у алюминиевого сплава, имеется перегиб, соответствующий пределу текучести слоев алюминиевого сплава.

Несмотря на различие предельных деформаций алюминиевого сплава и углепластика, при разрушении композита «алюминий–углепластик» реализуется 85–90% прочности алюминиевого сплава.

По аналогии с алюминиевыми сплавами для композита «алюминий–углепластик» может быть рассчитан условный предел текучести. Однако, в отличие от алюминиевых сплавов, проявляющих пластичность при напряжениях, превышающих предел текучести, у композита «алюминий–

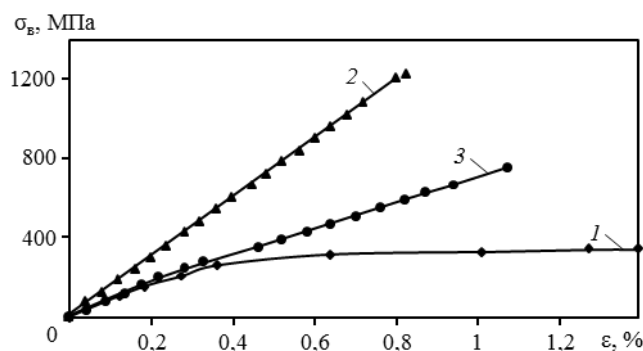


Рис. 2. Диаграмма деформирования алюминиевого сплава Д16ч.-АТ (1), углепластика (2) и металлополимерного композита «алюминий–углепластик» (3)

углепластик» благодаря высоким упруго-прочностным характеристикам слоя углепластика сохраняется высокое сопротивление растягивающим нагрузкам – вплоть до разрушения.

Отличительной особенностью механического поведения композита «алюминий–углепластик» при растяжении является сохранение монолитности слоистой структуры материала и совместная работа слоев металла и углепластика вплоть до разрушения. При этом на диаграмме растяжения регистрируется практически одновременное разрушение алюминиевых и углепластиковых слоев, а разрушенный образец композита не имеет расслоений.

С учетом особенностей механического поведения при растяжении скорректированы формулы для расчета значений модуля упругости и предела прочности металлополимерного композита «алюминий–углепластик» для двух зон напряженного состояния материала: I зона – до предела текучести металлических слоев и II зона – при напряжениях, превышающих предел текучести алюминиевого сплава Д16ч.-АТ:

$$- \text{до } \sigma_{0,2} < E_{KM} = E_M \frac{\delta_M}{\delta_M + \delta_Y} + E_Y \frac{\delta_Y}{\delta_M + \delta_Y};$$

$$- \text{после } \sigma_{0,2} > E_{KM} = E_Y \frac{\delta_Y}{\delta_M + \delta_Y};$$

$$- \text{до } \sigma_{0,2} < \sigma_{KM} = \sigma_{0,2M} \frac{\delta_M}{\delta_M + \delta_Y} \cdot \frac{E_M}{E_Y} + \sigma_Y \frac{\delta_Y}{\delta_M + \delta_Y};$$

$$- \text{после } \sigma_{0,2} > \sigma_{KM} = \sigma_{0,2M} \frac{\delta_M}{\delta_M + \delta_Y} + \sigma_Y \frac{\delta_Y}{\delta_M + \delta_Y};$$

где E_{KM} , σ_{KM} – модуль упругости и предел прочности при растяжении металлополимерного композиционного материала соответственно; E_M , $\sigma_{0,2M}$, δ_M – модуль упругости, предел текучести и толщина слоев металла соответственно; E_Y , σ_Y , δ_Y – модуль упругости, предел прочности и толщина слоев углепластика соответственно.

Механические характеристики исследованных типов металлокомпозита «алюминий–углепластик» представлены в табл. 2. В зависимости от состава и структуры пакета предел прочности при растяжении металлополимерного композита «алюминий–углепластик» изменяется от 290 до 900 МПа, модуль упругости – от 50 до 93 ГПа, предел прочности при сжатии – от 413 до 725 МПа.

Опытные образцы металлокомпозита (варианты 1 и 2), состоящие из двух слоев алюминиевого сплава Д16ч.-АТ и слоя углепластика со схемами укладки армирующего наполнителя [0]₃ и [0]₅, имеют предел прочности при растяжении >800 МПа в направлении расположения армирующих волокон. Таким образом, уровень свойств, достигнутый на опытных образцах разработанного металлополимерного композита, соответствует уровню свойств отечественных и зарубежных аналогов (табл. 3).

Исследование адаптационных характеристик

Адаптирующийся углепластик – материал, обладающий управляемой анизотропией свойств и состоящий из чередующихся слоев углеродного наполнителя, которые укладываются относительно нескольких осей анизотропии. При внешнем воздействии такая укладка создает,

Таблица 2

Механические характеристики опытных образцов металлокомпозита

Условный номер образца	Толщина, мм	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа
1	1,52	820	93	720	5,8
2	2,14	900	88	690	6,1
3	1,97	750	86	725	–
4	1,52	605	74	670	–
5	1,97	290	50	413	–

Таблица 3

Механические свойства слоистых композиционных материалов

Свойства	Значения свойств для			
	металло-полимерного материала «алюминий–углепластик»	отечественных аналогов		зарубежного аналога – слоистого материала ARALL (патент: ЕПБ №056289)
		слоистого металлоорганиопластика Алор Д16/41	адаптирующегося углепластика КМУ-7УМ	
Модуль упругости при растяжении, ГПа	87–93	65	110	50–65
Предел прочности при растяжении, МПа	820–900	800	650	800–1000

Таблица 4

Характеристики компонентов металлополимерного композита

Свойства	Значения свойств для	
	алюминиевого сплава Д16ч.-АТ	углепластика УОЛ-300-2-3к/ВК-36РТ
Плотность, г/см ³	2,78	1,51–1,55
Толщина, мм	0,41	0,22
Предел прочности при растяжении, МПа	395	1427
Предел текучести, МПа	280	–
Модуль упругости при растяжении, ГПа	78	126
Предел прочности при сжатии, МПа	–	865
Предел прочности при сдвиге $\tau_{1,2}$, МПа	–	6,8

Таблица 5

Механические свойства адаптирующегося металлоуглепластика в направлении [0]

Тип укладки пакета	Предел прочности при растяжении, МПа
Me+УП ([0] ₅)+Me	900
Me+УП ([15] ₄)+Me	278
Me+УП ([15] ₂ + [0]+ [15] ₂)+Me	530
Me+УП ([15] ₂ + [90]+ [15] ₂)+Me	334
Me+УП ([15] ₆)+Me	361

отличающиеся от нуля суммарный вектор или суммарный момент относительно этих осей, что вызывает пространственную деформацию материала. В результате неуравновешенности суммы сил и моментов относительно выбранных осей в материале появляются касательные напряжения кручения и вследствие возникающего крутящего момента материал деформируется, изгибаясь в плоскости. В случае нагружения напряжениями изгиба происходят два вида деформаций, изменяющих форму, – прогиб и крутка. Материал с такими свойствами можно создать на основе металлополимерного композита [17].

Для исследований адаптационных возможностей слоистого металлополимерного композита «алюминий–углепластик» изготовлены образцы следующего состава: два слоя алюминиевого сплава Д16ч.-АТ толщиной 0,45 мм с поверхностным анодно-оксидным покрытием; слой углепластика на основе углеродной ленты УОЛ-300 (5 слоев) и клевого пленочного связующего ВК-36РТ; промежуточные диэлектрические слои (между металлом и углепластиком) – на основе стеклоткани Э-0,04 (2 слоя) и клевого пленочного связующего ВК-36РТ. Основные свойства компонентов металлополимерного композита представлены в табл. 4.

В работах, проведенных ранее, определены укладки с наилучшим эффектом адаптации. В качестве базового угла ориентации волокон, влияющего на деформационные характеристики образцов, выбран угол, равный 15 град. В образцах варьировали процентное содержание монослоев с углом укладки 15 град. Исследованы четыре варианта металлоуглепластика со следующей структурой материала:

- Me+УП ([15]₄)+Me;
- Me+УП ([15]₂+ [0]+ [15]₂)+Me;
- Me+УП ([15]₂+ [90]+ [15]₂)+Me;
- Me+УП ([15]₆)+Me.

Результаты механических испытаний адаптирующегося металлоуглепластика с различными укладками приведены в табл. 5.

Исследования адаптационных характеристик металлоуглепластиков проводили на образцах, имеющих размеры 50×250 мм, толщину 2 мм и различную структуру армирования.

Для оценки влияния степени несбалансированности структуры углепластиков на их деформационные характеристики (прогиб, отношение крутки к изгибу) изготовлены и испытаны образцы с четырьмя вариантами укладки слоев.

Исследование адаптирующегося углепластика при статическом нагружении проводили по методике ЦАГИ на универсальной испытательной машине Zwick-1454. Схема измерения деформаций представлена на рис. 3. Результаты исследования при статическом нагружении приведены в табл. 6.

Получены следующие средние характеристики: прогиб в центре образца $W_0=36,1$ мм; угол крутки $\alpha=11,2$ град; относительная крутка $\alpha/W_0=0,31$.

Для повышения диэлектрических свойств на границе раздела «алюминий–углепластик» дополнительно вводили слой стеклоткани для защиты от коррозионного взаимодействия между слоями алюминиевого сплава и углепластика. Данная проблема рассмотрена в отдельном исследовании – работа [15]. С увеличением количества слоев стеклоткани происходит уменьшение прогибов концевой части образца и уменьшение разницы прогибов крайних точек. Без стеклоткани

Таблица 6

Результаты испытаний адаптирующегося металлополимерного композита

Условный номер образца	Ширина	Толщина	Схема укладки	Прогиб W_1	Прогиб W_2	Угол крутки α , град
	мм			мм		
1	50,4	1,73	Me+УП ([15] ₄)+Me	29	38,5	10,7
	50,3	1,74		31	41	11,2
	50,4	1,73		30	40	11,2
2	50,4	1,87	Me+УП ([15] ₂ + [0]+ [15] ₂)+Me	31	40	10,2
	50,3	1,95		34,5	46	12,8
	50,3	1,85		33	44,5	12,8
3	50,4	1,85	Me+УП ([15] ₂ + [90]+ [15] ₂)+Me	33	45	13,3
	50,4	1,88		33	44	12,3
	50,3	1,89		33	44	12,3
4	50,3	2,11	Me+УП ([15] ₆)+Me	32	43,5	12,9
	50,4	2,10		44	33	12,4
	50,4	2,09		43,5	32,5	12,2

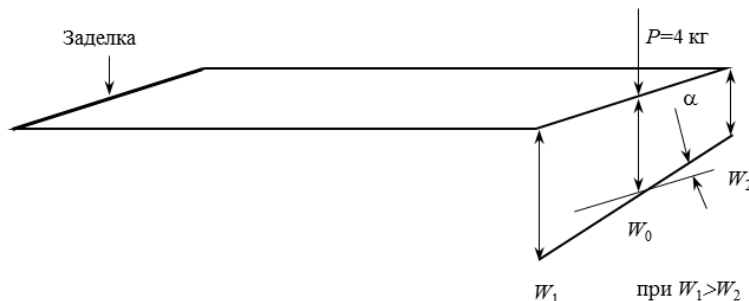


Рис. 3. Схема измерения деформаций (прогибов W и угла закрутки α) при оценке адаптационных свойств углепластика

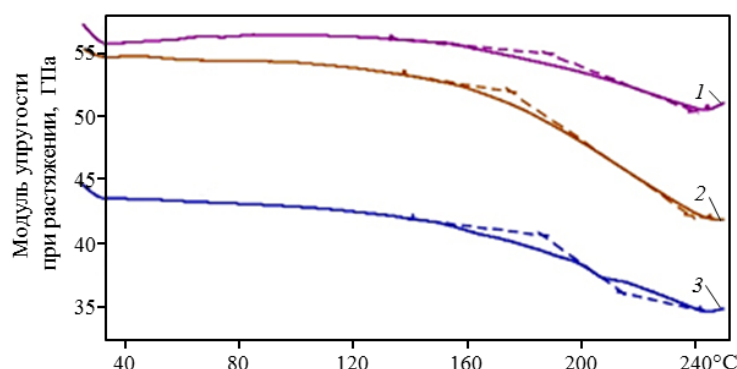


Рис. 4. Влияние количества электроизоляционной стеклоткани на механические свойства адаптирующегося углепластика, %: 10 (1); 20 (2) и 30 (3)

максимальные напряжения на обеих поверхностях образца одинаковые. С увеличением количества слоев стеклоткани разница напряжений на верхней и нижней поверхностях увеличивается. Это связано с ростом несбалансированности модуля упругости по толщине образца. При этом следует отметить, что максимальные напряжения с увеличением количества слоев стеклоткани не превышают максимальных напряжений в углепластике без стеклоткани.

Для выявления влияния количества электроизоляционной ткани на механические свойства углепластика изготовлены модельные образцы углепластика со схемой выкладки [0/0] с

введением различного количества электроизоляционной ткани Э1-30П (10; 20 и 30%) и определены температуры стеклования и упруго-деформационные свойства (рис. 4).

Температура стеклования полученных модельных образцов находится в интервале температур 150–160°C и практически не меняется от введения электроизоляционной стеклоткани. Модуль упругости при растяжении находится в прямой зависимости от количества введенной стеклоткани и изменяется от 55 ГПа на углепластике с 10% ткани Э1-30П до 45 ГПа на углепластике с 30% содержанием электроизоляционной стеклоткани. При этом уменьшение значений модуля при

температуре 240°C составляет до 10 ГПа (20%). По полученным результатам для достижения оптимальных упруго-прочностных характеристик выбрана структура пакета композиционного материала с соотношением 85% углеродного наполнителя и 15% электроизоляционной стеклоткани.

По результатам испытаний сделан вывод, что введение шести слоев электроизоляционной стеклоткани Э1-30П приводит к незначительному изменению механических свойств адаптирующегося углепластика.

Заключения

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что укладка слоев углепластика в композите «алюминий–углепластик» в направлении, отличающемся от главной оси, позволяет получить самоадаптирующийся материал, адаптационные свойства которого будут зависеть от проч-

ностных характеристик монослоев, объемного содержания в металлополимерном композите углепластика, схемы укладки слоев углепластика и степени несбалансированности структуры металлополимерного композиционного материала.

Результаты разработки свидетельствуют о перспективности применения интеллектуального металлокомпозита «алюминий–углепластик» в авиационно-космической технике. Применение композитов интеллектуального типа позволит снизить массу, увеличить срок эксплуатации, надежность и безопасность эксплуатации конструкции крыла транспортных, пассажирских и маневренных самолетов благодаря применению нового композиционного материала «алюминий–углепластик». Принцип разработки самоадаптирующихся металлокомпозитов также может быть использован при создании новых материалов для машиностроения, медицины, строительства и других отраслей техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
2. 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.
3. Bronowicki A.J., McIntyre L.J., Betros R.S., Dvorky G.R. Mechanical validation of smart structures // Smart Materials and Structures. 1996. No. 5. P. 129–139.
4. Голубкова Т.А., Короткова В.И., Золкина Т.Г., Гладышева Л.В. Концепции и основные принципы конструирования интеллектуальных материалов. Технология // Межотраслевой научно-технический сборник. Сер.: Конструкции из КМ. 1995. №2. С. 3–21.
5. Crawley T.F. Intelligent Structures for Aerospace: A Technology Overview and Assessment // AIAA Journal. 1994. Vol. 32. No. 8. P. 1689–1699.
6. Махсидов В.В., Яковлев Н.О., Ильичев А.В. и др. Определение деформации материала конструкции из ПКМ с помощью интегрированных оптоволоконных сенсоров // Механика композиционных материалов и конструкций. 2016. Т. 22. №3. С. 402–413.
7. Гуляев И.Н., Гуняев Г.М., Раскутин А.Е. Полимерные композиционные материалы с функциями адаптации и диагностики состояния // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 242–253.
8. Гуняев Г.М., Гуляев И.Н., Морозов Г.А. Композиционные материалы интеллектуального типа с функциями самодиагностики и адаптации для ответственных силовых конструкций летательных аппаратов // Актуальные вопросы авиационного материаловедения: сб. тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф. 2007. С. 95–96.
9. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Senatorova O.G. Laminated fibrous metal-polymer composites // Metal Matrix Composites. London, 1995. P. 487–570.
10. 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.
11. Композиционный слоистый материал: пат. 2188129 Рос. Федерация; заявл. 28.09.00; опубл. 27.08.02. Бюл. №24.
12. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В. Слоистые металлополимерные композиционные материалы // Авиационные материалы и технологии 2012. №S. С. 226–230.
13. Гуняев Г.М., Гуляев И.Н., Железина Г.Ф., Начинкина Г.В., Каримова С.А., Соловьева Н.А. Металлополимерный композит интеллектуального типа алюминий–углепластик // Актуальные вопросы авиационного материаловедения: сб. тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф. 2007. С. 101–102.
14. Бирюк В.И., Голован В.И., Гуняев Г.М., Крючков Е.И. Применение композиционных материалов в концевой части крыла для снижения веса крыла в целом // Труды ЦАГИ. Сер.: Прочность, колебания, ресурс авиационных конструкций и сооружений. 2002. Вып. 2658. С. 44–49.
15. Крыло летательного аппарата: пат. 2191137 Рос. Федерация; заявл. 28.12.00; опубл. 20.10.02. Бюл. №29.
16. 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. С. 127–133.
17. Лавров А.В., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю., Автаев В.В. Оптимизация структуры гибридных композиционных материалов авиационного назначения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №11 (47). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.12.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-7-7.