

УДК 539.3

*А.В. Лавров<sup>1</sup>, В.С. Ерасов<sup>1</sup>, Н.Ю. Подживотов<sup>1</sup>, В.В. Автаев<sup>1</sup>***ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-7-7

*Рассмотрены слоистые гибридные металлополимерные композиционные материалы с точки зрения выбора их состава и строения для различных условий функционирования. Показано влияние расположения и толщины высокомодульных слоев на цилиндрическую жесткость композита при симметричном и асимметричном (одностороннем) изгибе. Даны рекомендации по выбору гибридных композитов в зависимости от вида нагружения.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 6. «Слоистые металлополимерные, биметаллические и гибридные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** слоистые металлополимерные композиционные материалы, гибридные композиционные материалы.

*Layered hybrid metal-plastic composite materials are considered in the article from the point of view of optimisation of their composition for various conditions of functioning. Positioning and thickness influence of high-rigid layers on cylindrical rigidity of the composite is shown at a symmetric and asymmetric (unilateral) bend. Recommendations for choice of hybrid composites for various kinds of loads are given.*

*The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 6. «Layered metal-plastic, bimetallic and hybrid materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** composition laminate materials, hybrid composition materials.

---

<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**

В настоящее время композиционные материалы являются одними из наиболее перспективных для изготовления планера воздушного судна [1–4]. Гибридные композиты, сочетающие металлические и неметаллические компоненты, являются динамично развивающейся группой материалов [5–11], которые могут использоваться как для элементов силового набора и обшивки, так и для деталей интерьера летательных аппаратов.

Известно несколько значений термина «гибридный композиционный материал». Согласно работе [12], к данной группе относят материалы, имеющие в своем составе три или более компонента, регулирующих свойства композитов. Соответственно, указанные материалы могут быть полиматричными, обладающими двумя или более матричными компонентами, или полиармированными, с различными видами армирующих компонентов.

В работе [13] к гибридным относят композиты, в которых частицы дисперсной фазы имеют бимодальный гранулометрический состав.

Кроме того, к гибридным композитам традиционно принято относить слоистые композиционные материалы, в которых слои из металлических материалов (алюминиевые, титановые сплавы и т. д.) чередуются со слоями из полимерных композиционных материалов [5–8, 10]. Данная группа материалов объединяет положительные стороны традиционных металлических и полимерных композиционных материалов (ПКМ). Так, обладая большей удельной прочностью по сравнению с традиционными металлическими материалами, слоистые металлополимерные гибридные композиты имеют удовлетворительные характеристики пластичности, что повышает надежность деталей из таких материалов по сравнению с изготовленными из традиционных ПКМ.

Данная статья посвящена рассмотрению слоистых гибридных композитов с точки зрения обеспечения их оптимальных механических свойств.

### Материалы и методы

Запишем условие совместности деформаций составляющих слоистого гибридного композита для случая одноосного нагружения в плоскости листа:

$$\varepsilon_{Me} = \varepsilon_{ПКМ} = \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация в направлении приложения нагрузки, %; индексы Me и ПКМ относятся к металлическим слоям гибрида и к слоям из полимерного композиционного материала соответственно.

Поскольку суммарная нагрузка  $P$ , воспринимаемая композитом, равна сумме нагрузок, воспринимаемых металлической и ПКМ составляющими, с учетом допущения об упругой изотропии составляющих и равенстве их коэффициентов Пуассона, из выражения (1) получим:

$$P = \sigma_{Me} F_{Me} + \sigma_{ПКМ} F_{ПКМ}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $F$  – суммарная площадь поперечного сечения композита, занятая данной структурной составляющей (Me или ПКМ), м<sup>2</sup>.

Из уравнений (1) и (2) получим:

$$P = \varepsilon (E_{Me} F_{Me} + E_{ПКМ} F_{ПКМ}), \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа, в составляющих гибридного композита в направлении приложения нагрузки.

Таким образом, выбирая соотношение модулей упругости и (или) объемных долей металлической и ПКМ составляющей композита, можно регулировать уровень напряжений в его слоях при данном  $P$  и оптимизировать свойства материала для различных видов нагружения.

### Результаты

Рассмотрим некоторые случаи нагружения слоистого гибридного композита с точки зрения оптимизации его состава.

1. Статическое растяжение в плоскости листа. В данном случае, согласно формуле (3), целесообразно использовать слои ПКМ с возможно большим модулем упругости, что позволит повысить несущую способность за счет снижения напряжений в металлической составляющей. Жесткость при растяжении будет линейно возрастать с увеличением объемной доли высокомодульной составляющей композита. Наиболее оптимальными в данном случае являются композиции «алюминиевый сплав–высокомодульный однонаправленный органопластик» [14] и «титановый сплав–

углепластик» [6]. При выборе компонентов гибридного композита следует учитывать их электрохимическую совместимость [15].

2. Статическое сжатие в плоскости листа. Для гибридов на основе ПКМ, которые при сжатии в плоскости листа обладают более низкими значениями модуля упругости, чем металлическая составляющая, для повышения жесткости композита и надежности изделий из него следует увеличивать объемное содержание металлической составляющей. При этом, как следует из формулы (3), в результате снижения значений  $\varepsilon$  для данного уровня внешней нагрузки напряжения как в металлической, так и в ПКМ составляющей будут снижаться.

3. Устойчивость при продольном изгибе или знакопеременный (симметричный) изгиб. Поскольку ПКМ, как правило, имеют более низкие значения предела прочности и модуля упругости при сжатии по сравнению с растяжением, для случаев знакопеременного изгиба или сжатия до потери устойчивости целесообразно располагать слои гибридного композита таким образом, чтобы крайние слои («обкладки») были выполнены из металлических материалов с высокими значениями удельной прочности и жесткости.

В качестве примера на рис. 1 показана местная потеря устойчивости и разрушение четырехстрингерного конструктивно-подобного образца слоистой металлополимерной панели крыла из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469-Т1 («обкладки» обшивки, стрингеры) и однонаправленного слоистого алюмокомпозитного СИАЛ-1-1Р на базе сплава 1441 при испытаниях на сжатие с оценкой несущей способности (разработка и изготовление образца производились на самолетостроительном предприятии ПАО «ВАСО» в сопровождении специалистов ФГУП «ВИАМ» В.В. Сидельникова, Н.Ю. Серебrenниковой, Е.В. Котовой, испытания проводились во ФГУП «ЦАГИ»).

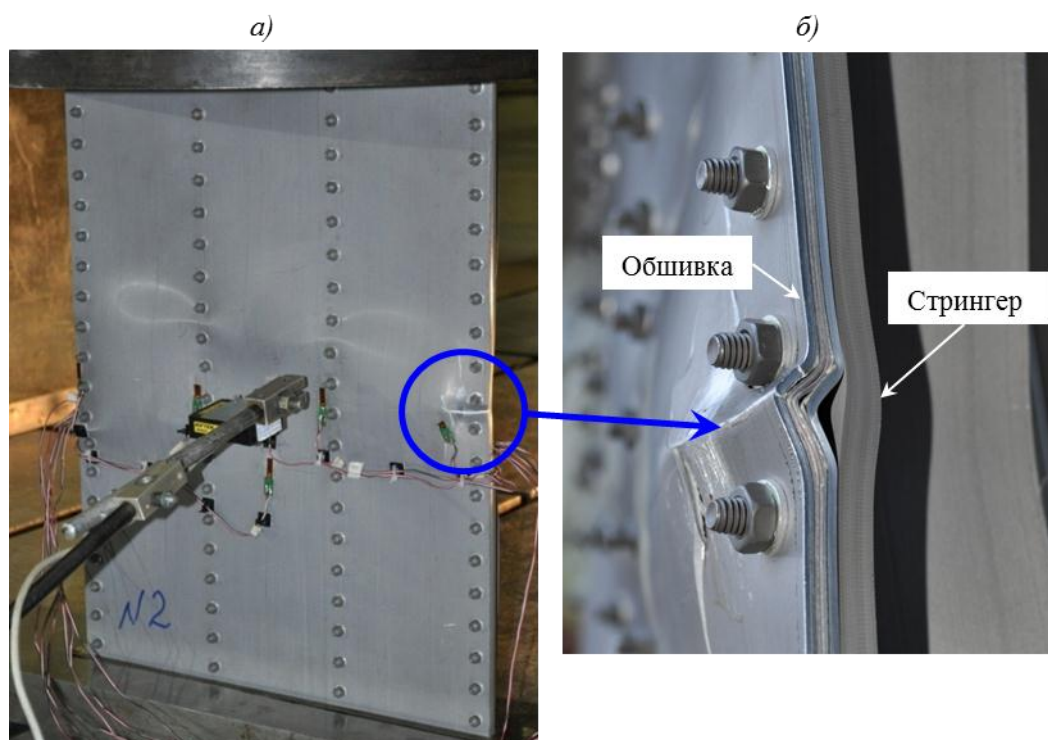


Рис. 1. Местная потеря устойчивости и разрушение четырехстрингерного конструктивно-подобного образца слоистой металлополимерной панели крыла из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469-Т1 («обкладки», стрингер) и однонаправленного слоистого алюмокомпозитного СИАЛ-1-1Р на базе сплава 1441 при испытаниях на сжатие (несущую способность): общий вид (а); увеличенное место разрушения (б)

Увеличение толщины высокомодульных обкладок будет приводить к увеличению цилиндрической жесткости и жесткости при сжатии [16]. При этом следует учитывать следующее:

- с увеличением объемной доли металлической составляющей поверхностная плотность композиции будет линейно возрастать;
- существует предельное значение толщины обкладок, превышение которого не даст заметного увеличения жесткости композиции.

На рис. 2 представлены результаты расчета цилиндрической жесткости трехслойной симметричной панели по методике, изложенной в работе [16], где по горизонтальной оси отложены значения относительной толщины обкладок ( $S$ ), равной отношению суммы толщин обкладок к толщине центрального слоя при общей толщине композиции 9 мм; по вертикальной оси отложены значения цилиндрической жесткости ( $D$ ) композиции.

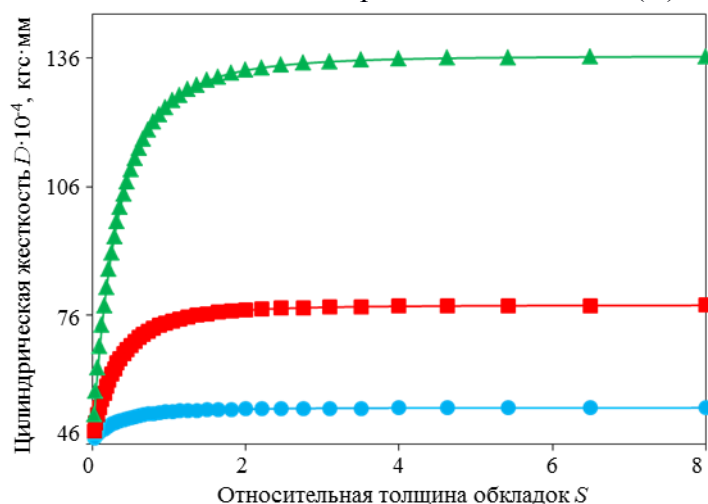


Рис. 2. Зависимость цилиндрической жесткости трехслойной панели от относительной толщины обкладок из Al–Li сплава (●), титана (■) и стали (▲)

В качестве материала обкладок использовали сталь, титановый и алюминий-литиевый сплавы. Материал центрального слоя – слоистый гибридный композит типа СИАЛ [4, 7]. Расчет проводили в предположении изотропии упругих характеристик материалов. Свойства материалов, использованные в расчете, представлены в таблице.

#### Механические свойства материалов гибридного композита

| Свойства              | Значения свойств  |             |                   |                           |
|-----------------------|-------------------|-------------|-------------------|---------------------------|
|                       | центрального слоя | обкладок из |                   |                           |
|                       |                   | стали       | титанового сплава | алюминий-литиевого сплава |
| Модуль упругости, ГПа | 69                | 200         | 112               | 78                        |
| Коэффициент Пуассона  | 0,33              | 0,33        | 0,33              | 0,33                      |

Из данных, приведенных на рис. 2, следует, что для всех использованных в расчете материалов обкладок графики подобны и отличаются только масштабом по вертикальной оси. При малых значениях  $S$  небольшое увеличение толщины обкладок приводит к интенсивному росту параметра  $D$ , однако при дальнейшем увеличении толщины обкладок рост жесткости замедляется. При значении  $S=2$  (толщина каждой из обкладок равна толщине центрального слоя) значение  $D$  отличается на величину  $\sim 2\%$  от соответствующего значения для  $S$ , равного 8 (толщина каждой из обкладок в 4 раза превышает толщину центрального слоя). Данная закономерность наблюдается для всех материалов обкладок.

С увеличением  $S$  снижается зависимость  $D$  от жесткости центрального слоя. Так, при  $S$ , равном 2, значение  $D$  в случае центрального слоя с модулем упругости 69 ГПа отличается от соответствующего значения для композиции с модулем упругости 60 ГПа на величину  $\sim 1\%$ .

Следует отметить, что среди использованных в расчете материалов обкладок при одинаковой поверхностной плотности более высокими значениями цилиндрической жесткости обладают композиции с обкладками из алюминий-литиевого сплава, имеющего наиболее высокие значения удельной жесткости.

#### 4. Асимметричный (односторонний) изгиб.

При асимметричном изгибе, с учетом изложенного в пп. 1–3, укладку слоев целесообразно осуществлять таким образом, чтобы со стороны действия растягивающих напряжений объемное содержание высокомодульного ПКМ было максимальным; со стороны действия сжимающих напряжений должно быть максимальное содержание металлической составляющей в виде утолщенной обкладки. В области нейтрального слоя композита целесообразно располагать слои различного функционального назначения, например, слои стеклоткани, повышающие характеристики жаростойкости композиции [7].

По методике расчета трехслойных панелей с изотропным наполнителем [16] проведен расчет цилиндрической жесткости слоистого гибридного композита в зависимости от его состава. В качестве исходных данных принимали, что композит состоит из слоя ПКМ с модулем упругости 150 ГПа, промежуточного слоя с модулем упругости 69 ГПа и металлического слоя из алюминий-литиевого сплава с модулем упругости 80 ГПа.

На рис. 3 приведены графики зависимости цилиндрической жесткости композита от толщины обкладки из ПКМ при различной толщине металлической обкладки (от 1 до 6 мм) для общей толщины композита 9 мм. Видно, что при увеличении толщины высокомодульного слоя ПКМ жесткость композита возрастает. При толщине обкладки ПКМ от 3 до 5 мм (поверхность контакта «ПКМ–промежуточный слой» находится вблизи нейтрального слоя) рост цилиндрической жесткости замедляется. При дальнейшем увеличении толщины слоя ПКМ (переход поверхности контакта «ПКМ–промежуточный слой» в область сжатия) рост цилиндрической жесткости интенсифицируется.

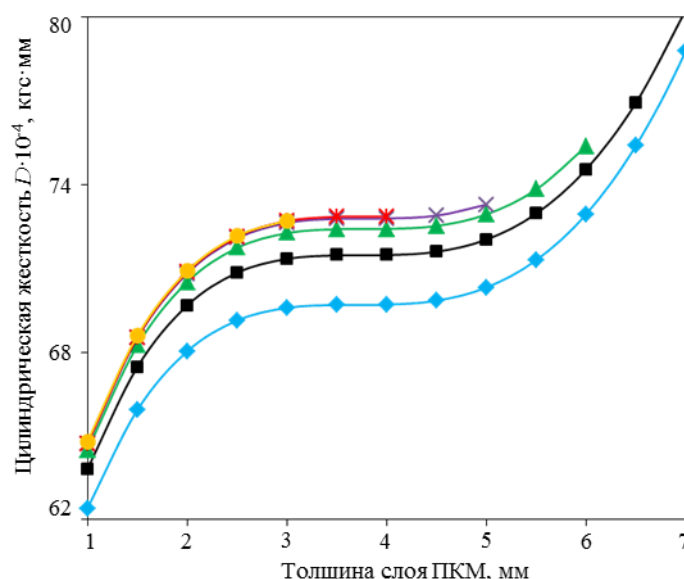


Рис. 3. Зависимость цилиндрической жесткости композиции от толщины обкладки из ПКМ для различных толщин обкладки из Al–Li сплава: 1 (♦), 2 (■), 3 (▲), 4 (×), 5 (\*) и 6 мм (●)

Цилиндрическая жесткость композита увеличивается при увеличении толщины металлической обкладки от 1 до 4 мм, при дальнейшем увеличении толщины металлической обкладки роста жесткости не происходит.

Поверхностная плотность композита снижается, а цилиндрическая жесткость увеличивается при увеличении толщины слоя ПКМ. Таким образом, для композита, работающего в условиях одностороннего изгиба, целесообразно максимально увеличивать толщину слоя ПКМ. Ограничение по толщине слоя ПКМ обусловлено максимальной величиной сжимающих напряжений, которые не приводят к разрушению ПКМ при данных условиях нагружения.

5. Скорость роста трещины усталости, усталость при растяжении.

В широко известных слоистых композитах типа СИАЛ [4, 7–9], состоящих из чередующихся слоев алюминиевого сплава и стеклопластика, значения скорости роста усталостной трещины на некотором участке кинетической диаграммы усталостного разрушения на порядок ниже, чем для монолитного листа из соответствующего алюминиевого сплава, равного с композитом по толщине. Однако, поскольку модуль упругости стеклопластика ниже, чем у алюминиевого сплава, металлическая составляющая в данных материалах воспринимает повышенную нагрузку и образование усталостной трещины в таких материалах происходит значительно раньше, чем в монолитных алюминиевых сплавах. При достижении усталостной трещиной длины, обеспечивающей ее раскрытие, достаточное для передачи нагрузки на разрушенном участке слоям стеклопластика, скорость роста трещины резко снижается и далее трещина практически не развивается. Таким образом, данные материалы целесообразно использовать в конструкциях, допускающих наличие трещин безопасной длины и не предъявляющих повышенных требований к жесткости.

При наличии требований к жесткости в композиции целесообразно использовать ПКМ, обладающий более высокими значениями модуля упругости и предела прочности при растяжении, чем у металлической составляющей, например: алюминиевый сплав–высокомодульный однонаправленный органопластик, титановый сплав–углепластик.

При этом в соответствии с формулой (3) следует ожидать уменьшения напряжений в металлической составляющей и повышения долговечности до образования трещины, а также значений порогового коэффициента интенсивности напряжений  $K_{th}$ .

### Заключение

На примере некоторых видов статического и циклического нагружения показано, что эффективность функционирования слоистого металлополимерного композиционного материала для каждого вида нагружения определяется свойствами материалов металлических и ПКМ слоев, их толщинами и последовательностью расположения в композите.

Таким образом, состав и структура слоистого гибридного металлополимерного композита должны выбираться с учетом предполагаемых условий его применения в конструкции, в том числе – характера приложенных нагрузок. В этом случае можно ожидать дальнейшего повышения эффективности использования данных материалов в конструкциях авиационной техники.

### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 813.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
4. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмокомпозиты СИАЛ-1441 и сотрудничество с AIRBUS и TU DELFT // Цветные металлы. 2013. №9 (849). С. 50–53.
5. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю. Выбор схемы расположения высокомодульных слоев в многослойной гибридной пластине для ее наибольшего сопротивления потере устойчивости // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 109–117.
6. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №10. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.02.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
7. 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.
8. Антипов В.В. Технологичный алюминийлитиевый сплав 1441 и слоистые гибридные композиты на его основе // Metallurg. №5. 2012. С. 36–39.
9. 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.
10. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Аниховская Л.И. Клеевые препреги для слоистых алюмокомпозитов класса СИАЛ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.02.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-4-4.
11. Белоус В.Я., Лощина А.О., Варламова В.Е., Никитин Я.Ю. Коррозионная стойкость и подготовка поверхности холоднокатаной ленты из стали ВНС-9-Ш для изготовления металлополимерного композиционного материала // Труды ВИАМ: электрон. науч. технич. журн. 2015. №11. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.02.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-10-10.
12. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.
13. Пропедевтическая стоматология: учеб. для медицинских вузов / под ред. Э.А. Базикяна. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. 768 с.
14. Железина Г.Ф. Трещиностойкие металлоорганопластики для авиационных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 1996. 32 с.
15. Трефилов Б.Ф. Разработка и исследование углеалюминиевого композиционного материала ВКУ-1 // Авиационные материалы. М.: ОНТИ ВИАМ, 1981. Вып. 1. С. 17–25.
16. Прочность, устойчивость, колебания: справочник в 3 т. / под общ. ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. Т. 2. 464 с.