

УДК 678.067.5

*Ю.О. Попов<sup>1</sup>, Т.В. Колокольцева<sup>1</sup>, Ю.А. Гусев<sup>1</sup>, А.А. Громова<sup>1</sup>***РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЛИСТОВОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА ДЛЯ ОБШИВОК ХВОСТОВЫХ ОТСЕКОВ ЛОПАСТИ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-36-41

*Приведено описание создания стеклопластика для обшивок хвостовых отсеков лопастей несущего винта вертолета взамен используемых в настоящее время обшивок из органотекстолита. Для изготовления обшивок было решено использовать однонаправленный стеклопрепег и два слоя стеклоткани, образующие при формовании в автоклаве монолитный пластик с заданным содержанием связующего. Проведен выбор оптимальной схемы армирования из двух вариантов. По результатам стендовых испытаний показано, что при выбранной схеме армирования стеклопластик обладает высокими прочностными свойствами, стойкостью к образованию краевых усталостных трещин и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к обшивкам хвостовых отсеков лопастей.*

**Ключевые слова:** органотекстолит, стеклотекстолит, стеклопластик, гибридный стеклопластик, обшивки хвостовых отсеков.

*A description how to create fiberglass for tail section skins of helicopter rotor blades instead of the currently used skins of organic textolite is provided. In order to make the skins it was decided to use unidirectional prepreg and two layers of glass textileforming in autoclave a monolith plastic with fixed binder content. A selection of optimal reinforcement scheme from two options is executed. Bench test results showed that at the chosen reinforcement scheme the fiberglass plastic has high strength characteristics, endurance crack resistance and meets all the requirements for the tail section skins of helicopter blades.*

**Keywords:** organic textolite, glass textolite, glass reinforced plastic, hybrid plastic, tail blade panels.

<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**

Область применения конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе препрегов (предварительно пропитанных связующим волокон армирующего наполнителя) является одной из самых перспективных в авиа- и вертолетостроении. В настоящее время доля ПКМ в конструкциях вертолетов может достигать 50%, и производители стремятся ее увеличить [1].

Для изготовления лопастей вертолетов, как одних из наиболее нагруженных деталей, в ВИАМ разработан ряд перспективных материалов, в том числе стеклопластиков и гибридных стеклоуглепластиков для изготовления лонжеронов, а также листовых органотекстолитов, используемых в качестве обшивок хвостовых отсеков сотовой конструкции [2–4].

В настоящее время ведущие зарубежные и отечественные разработчики ПКМ ведут исследования, направленные на создание материалов и технологий, позволяющих снизить затраты при изготовлении изделий из ПКМ [5].

Листовые органотекстолиты, используемые в настоящее время в качестве обшивок хвостовых отсеков, являются наиболее легкими и прочными материалами, способными противостоять воздействию динамических нагрузок на лопасть несущего винта (ЛНВ) вертолета, возникающих в полете [6].

Тем не менее в связи с высокой стоимостью органотекстолитов создателями вертолетной техники была поставлена задача разработать более дешевый листовой стеклопластик, который по весовым характеристикам (поверхностной плотности), прочности и стойкости к циклическим нагрузкам не уступает Органитам, а также обладает повышенной климатической стойкостью [7]. Попытки решить эту проблему простой заменой органотекстолитов на стеклотекстолиты с различными схемами укладки слоев ( $[0^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 0^\circ]$  и  $[0^\circ, \pm 45^\circ, 0^\circ]$ ) не увенчались успехом. На рис. 1 изображен разрушенный хвостовой отсек с обшивками из препрега марки КМКС-2м.120.Т-64(ВМП).30 со схемой армирования  $[0^\circ, \pm 45^\circ, 0^\circ]$ , выдержавший  $<1$  млн циклов.

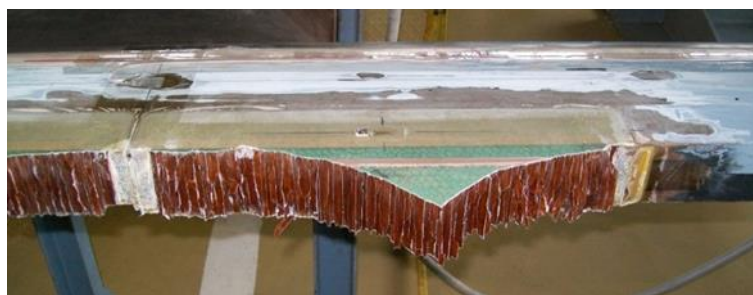


Рис. 1. Разрушение отсека с обшивками из препрега марки КМКС-2м.120.Т-64(ВМП).30

Разрушение вызвано недостаточной стойкостью стеклотекстолитов к возникновению и быстрому прорастанию «краевой» усталостной трещины, которая возникает на обшивках отсеков в плоскости задней стенки лонжерона от вертикальных перемещений лопасти в процессе прохождения полного оборота. По-видимому, узлы пересечений нитей утка и основы стеклотканей провоцируют образование усталостных трещин в обшивках и последующее разрушение отсеков.

### Материалы и методы

Для поиска оптимального варианта конструкции обшивки проведен анализ возможных вариантов армирования пластика обшивки и рассмотрены альтернативные материалы, в том числе однонаправленные ПКМ. Известно, что однонаправленные стеклопластики имеют высокую удельную ударную вязкость и усталостную прочность при изгибе в направлении, поперечном армированию, так как не имеют пересечений волокон наполнителя в пределах монослоя как у стеклотекстолитов. Кроме того, практика применения однонаправленных стеклопластиков [8] в качестве стопперов усталостных трещин в слоистых конструкциях авиационной техники показывает их эффективность. Исходя из этих фактов было принято решение применить однонаправленный стеклопластик в качестве одного из армирующих слоев в составе материала обшивки.

Известно, что поверхностную плотность наполнителя в однонаправленных препрегах можно регулировать плавно и в широком диапазоне, используя жгутовые наполнители различной линейной плотности и изменяя шаг их распределения по ширине препрега. В данном случае, когда поверхностная плотность обшивки была задана изначально, не представляло сложности провести расчет допустимой поверхностной плотности наполнителя и связующего в препреге, далее подобрать стеклоровинг по линейной плотности и определить шаг его распределения по ширине препрега. Конструк-

тивно-технологическое решение изготовления материала обшивки тогда будет основываться на «ключевой» операции – изготовлении однонаправленного стеклопрепрега с расчетными поверхностными плотностями наполнителя и связующего. При этом препрег будет являться «носителем» связующего для пропитки всего объема наполнителя обшивки (стеклоровинг+два слоя ткани Т-64(ВМП)) и обеспечит объемное содержание наполнителя 48–52% – оптимальное для стеклопластиков. Таким образом, из технологической цепочки изготовления обшивки будет исключена дорогостоящая операция изготовления препрега на основе стеклоткани. Пропитка стеклоткани будет происходить во время формования пластика – по аналогии с пленочной технологией изготовления ПКМ, известной как метод RFI [9]. Применение такой технологии значительно сократит издержки производства и обеспечит получение материала обшивки с требуемыми прочностными и эксплуатационными характеристиками.

Исходя из предварительных технических требований к материалу (табл. 1), выдвинутых разработчиком изделия, рассчитывали весовые характеристики однонаправленного препрега таким образом, чтобы суммарная поверхностная плотность получаемого пластика, включая стекловолокно, связующее и два слоя сухой ткани Т-64(ВМП), не превышала заданную: 580 г/м<sup>2</sup>.

Таблица 1

**Предварительные технические требования к материалу обшивок**

Показатели	Значения показателей
Предел прочности при растяжении, МПа (не менее)	550
Толщина пластика, мм	0,3–0,4
Масса 1 м <sup>2</sup> пластика, г (не более)	580
Ресурс обшивок при циклических нагрузках при стендовых испытаниях в составе конструкции, циклов (не менее)	2·10 <sup>6</sup>

Поверхностную плотность связующего в однонаправленном препреге рассчитывали таким образом, чтобы связующего было достаточно для пропитки двух сухих слоев стеклоткани, при этом содержание связующего в отформованном пластике должно быть в пределах 31–35%. Далее провели расчеты весовых характеристик однонаправленного препрега, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Расчетные характеристики однонаправленного препрега**

Свойства препрега	Значения свойств
Масса 1 м <sup>2</sup> препрега, г (не более)	380
Масса 1 м <sup>2</sup> стекловолокна в препреге, г	180
Масса 1 м <sup>2</sup> связующего в препреге, г	190
Содержание связующего в препреге, %	48–50

Специфика работы материала обшивок в составе хвостовых отсеков лопасти вертолета предполагает непредсказуемость критического параметра статической и/или динамической прочности материала, который смог бы быть определяющим при выборе схемы армирования. Оптимальная схема армирования может быть выбрана только после проведения динамических испытаний обшивки в составе хвостового отсека в условиях, приближенных к реальной работе конструкции. Для сокращения количества вариантов схем армирования и объема испытаний для предварительных динамических испытаний выбрали два альтернативных по свойствам материала:

- вариант 1 имеет преимущества по прочности при сдвиге в плоскости листа;

– вариант 2 имеет преимущества по прочности и модулю упругости в направлении [90°].

Прогнозируемые свойства двух вариантов представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Альтернативные варианты схем армирования обшивок  
и расчетный уровень их свойств**

Вариант	Схема армирования	$\sigma_b$ , МПа		$E$ , ГПа		$\tau_{12}$ , МПа
		в направлении приложения нагрузки				
		[0°]	[90°]	[0°]	[90°]	
1	T-64 [+45°]/РВМПН [0°]/T-64 [-45°]	750	240	27	13	250
2	T-64 [90°]/РВМПН [0°]/T-64 [90°]	800	400	25	25	160

Для пропитки препрега выбрали клеевое связующее ВСК-14-2МР.120 как наиболее технологичное для пропитки однонаправленных наполнителей на расплавной пропиточной установке ВЛ-2800 [10, 11]. Для изготовления препрега использовали ровинг марки РВМПН-10-600-14 на основе стекла марки ВМП. Далее из полученного препрега методом автоклавного формования [12] изготовили опытные образцы «гибридного» стеклопластика с выбранными схемами укладки слоев. Для изготовления опытных образцов выбрали метод автоклавного формования в связи с тем, что менее дорогой и энергоемкий метод вакуумного формования не позволил бы получить образцы с заданными весовыми, прочностными характеристиками и толщиной, а также с низкой пористостью [13–15].

### Результат

В процессе отработки сборки заготовок обшивок установлено, что обшивки, собранные по варианту 2, наиболее предпочтительны как с точки зрения расхода стеклоткани Т-64, так и трудоемкости сборки. Далее провели оценку свойств обшивок на соответствие техническим требованиям (см. табл. 1). Характеристики пластика представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Характеристики двух вариантов пластика обшивок**

Свойства	Значения свойств пластика	
	Вариант 1	Вариант 2
Толщина пластика, мм	0,31–0,35	0,31–0,35
Масса 1 м <sup>2</sup> пластика, г	540–570	540–570
Предел прочности при растяжении, МПа, в направлении:		
[0°]	750–780	850–950
[90°]	220–250	390–420

Видно, что у пластика, изготовленного по варианту 2, значения прочности существенно превышают аналогичные значения у пластика, изготовленного по варианту 1.

Образцы обшивок передали Заказчику для оценки стойкости при воздействии циклических нагрузок в составе конструкций хвостовых отсеков.

Предварительные испытания показали, что оба варианта обшивок выдерживают назначенный ресурс  $2 \cdot 10^6$  циклов без разрушения отсеков, но в обшивках, изготовленных по варианту 1, наблюдалось образование трещин вдоль направления [0°] – направления волокон стеклоровинга (рис. 2). Таким образом, для дальнейших испытаний выбрали обшивки, изготовленные по варианту 2.

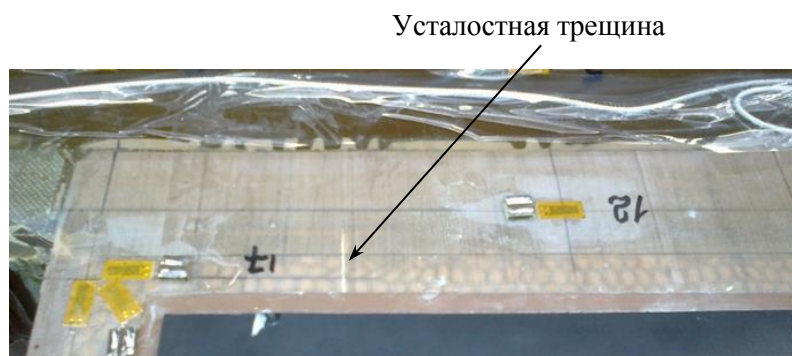


Рис. 2. Образование усталостной трещины в обшивке, изготовленной по варианту 1

Далее изготовили и передали Заказчику две опытные партии обшивок для проведения зачетных стендовых и летных испытаний. Проведенные стендовые испытания подтвердили, что разработанный «гибридный» стеклопластик в качестве обшивок показывает стабильную стойкость к образованию трещин и выдерживает количество циклов в 2–3 раза большее, чем назначенный ресурс.

Разработанному стеклопластику присвоена марка ВПС-53К, на него оформлены технические условия ТУ1-595-1496–2015, где зафиксированы его следующие технические характеристики:

– толщина .....	0,35±0,05 мм;
– масса 1 м <sup>2</sup> .....	525–578 г;
– предел прочности при растяжении в направлении	
[0°] .....	720 МПа;
[90°] .....	380 МПа;
– максимальный габарит листов .....	460×920 мм.

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» проводятся комплексные испытания стеклопластика ВПС-53К в объеме общей квалификации, а также осваивается его серийное производство для использования в отрасли.

### Обсуждение и заключения

В результате исследований разработан «гибридный» стеклопластик для обшивок хвостовых отсеков лопастей вертолетов с оптимальной укладкой слоев стеклоткани и препрега. Стеклопластик показал высокий уровень механических свойств, стабильную стойкость к образованию трещин и полностью соответствует техническим требованиям Заказчика. Использование данного материала позволит сократить стоимость производства обшивок при сохранении их эксплуатационных качеств.

После завершения испытаний в объеме общей квалификации «гибридный» стеклопластик марки ВПС-53К может быть рекомендован для проведения летных испытаний и дальнейшего внедрения в конструкцию лопасти вертолета.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
2. Давыдова И.Ф., Каблов Е.Н., Кавун Н.С. Термостойкие негорючие полиимидные стеклотекстолиты для изделий авиационной и ракетной техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. №7. С. 2–11.
3. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Хрульков А.В. Новое поколение материалов и технологий для изготовления лонжеронов лопастей вертолета // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S2. С. 5–9.

4. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Плетинь И.И., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А. Разработка и производство конструкционных органопластиков для авиационной техники // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. №4–2. С. 411–416.
5. 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.
6. Железина Г.Ф. Особенности разрушения органопластиков при ударных воздействиях // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 272–277.
7. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 19–27.
8. Вавилова М.И., Кавун Н.С. Свойства и особенности армирующих стеклянных наполнителей, используемых для изготовления конструкционных стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 33–37.
9. Тимошков П.Н., Платонов А.А., Хрульков А.В. Пропитка пленочным связующим (RFI) как перспективная безавтоклавная технология получения изделий из ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №5. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.06.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-9-9.
10. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 260–265.
11. Чурсова Л.В., Душин М.И., Коган Д.И., Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Платонов А.А. Пленочные связующие для RFI-технологии // Российский химический журнал. 2010. №1. С. 63–66.
12. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.
13. Душин М.И., Коган Д.И., Хрульков А.А., Гусев Ю.А. Причины образования пористости в изделиях из полимерных композиционных материалов // Композиты и наноструктуры. 2013. №3 (19). С. 60–71.
14. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 20–26.
15. Борщев А.В., Хрульков А.В., Халтурина Д.С. Изготовление низкопористого полимерного композиционного материала для применения в слабо- и средненагруженных конструкциях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №7. Ст.03 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.06.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-3-3.