



Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский  
научно-исследовательский институт авиационных материалов»,  
Государственный научный центр Российской Федерации

(ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ)

Технологическая платформа «Новые полимерные композиционные  
материалы и технологии»

**Всероссийская научно-техническая конференция  
«Полимерные композиционные материалы нового  
поколения. Трансфер инноваций из авиации в  
приоритетные сектора экономики России»**

Материалы конференции

17 августа 2018 г.

г. Ульяновск

Электронное издание

**Москва**

**2018**

УДК 678

ББК 35.719 + 30.36 + 34.651

П50

*Редакционная коллегия:*

А.Е. Раскутин – к.т.н., начальник НИО «Полимерные композиционные материалы и технологии их переработки»; Д.С. Лаврищев, заместитель начальника отдела; Е.А. Шеин, к.т.н., главный специалист; М.С. Закржевская, инженер 2-й категории.

**Полимерные композиционные материалы нового поколения.**  
П50 **Трансфер инноваций из авиации в приоритетные сектора экономики России** : материалы Всероссийской научно-технической конференции (г. Ульяновск, 17 августа 2018 г.), [Электронный ресурс] / ФГУП «ВИАМ». – М. : ВИАМ, 2018. – 120 с. : ил. – ISBN 978-5-905217-30-2. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/Vista/7; Adobe Reader; дисковод CD-ROM; 10 Мб. – Загл. с экрана.

Представлены доклады ведущих ученых и специалистов по следующим тематическим направлениям: полимерные композиционные материалы для строительства и энергетики; перспективные технологии переработки ПКМ для изготовления конструкций на их основе; интеллектуальные материалы и встроенный контроль изделий из ПКМ; развитие компонентной базы и полуфабрикаты ПКМ (связующие, наполнители, преформы, препреги) для применения в гражданских отраслях промышленности; методы исследования и испытаний ПКМ; оборудование и программное обеспечение для композитов.

Конференция посвящается Дню Воздушного флота Российской Федерации (в рамках «Международного авиатранспортного форума МАТФ-2018»).

УДК 678

ББК 35.719 + 30.36 + 34.651

## **Организационный комитет**

(ФГУП «ВИАМ»)

### **Председатель:**

Д.В. Гращенко – к.т.н., заместитель Генерального директора по неметаллическим материалам.

### **Заместители председателя:**

А.Е. Раскутин – к.т.н., начальник НИО «Полимерные композиционные материалы и технологии их переработки».

### **Члены организационного комитета:**

Д.Е. Каблов – к.т.н., заместитель начальника управления;

Д.Н. Куколев – начальник управления;

А.А. Каныгин – начальник управления;

В.Г. Дворяшин – заместитель начальника управления;

В.И. Постнов – д.т.н., начальник УНТЦ ВИАМ

Д.А. Браилко – начальник сектора;

Е.В. Лахтикова – начальник сектора;

И.Ю. Ширяева – главный специалист по маркетингу;

Д.С. Трушин – ведущий инженер;

Е.А. Цилин – инженер 2-й категории;

Л.В. Прохорова – специалист по выставочной деятельности.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Исследование болтовых соединений элементов из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП).....</b>	<b>6</b>
Кузнецов И.Л.; Фахрутдинов А.Э.; Арипов Д.Н.	
<b>Опыт применения вакуум-инфузионных технологий в производстве конструкций из ПКМ .....</b>	<b>16</b>
Вешкин Е.А.; Постнов В.И.; Постнова М.В.; Баранников А.А.	
<b>Применимость радиоволновых методов для испытаний и диагностики композитов авиационного назначения для вновь запускаемых изделий.....</b>	<b>29</b>
Дмитриенко Г.В.; Ривин Г.Л.	
<b>Управление риском процессов использования композиционных материалов в эксплуатации воздушных судов .....</b>	<b>46</b>
Ионов В.В.	
<b>Компетенции государственных научных центров России в создании композитных крыльев самолетов.....</b>	<b>51</b>
Комиссар О.Н.	
<b>Применение направленной укладки волокна для получения высоконагруженных конструкций.....</b>	<b>60</b>
Халиулин В.И.; Константинов Д.Ю.; Батраков В.В.	
<b>Опыт применения ПКМ в отраслях машиностроения .....</b>	<b>69</b>
Постнов В.И.	
<b>Разработка и внедрение высоконагревостойких кремнийорганических прессматериалов для электрической техники, устойчивой к экстремальным температурам и воздействию пожара .....</b>	<b>78</b>
Астахов П.А.; Сальников А.А.	

**Оценка нагруженности арочных элементов моста с использованием оптоволоконных датчиков деформации..... 91**

Махсидов В.В.; Кашарина Л.А.; Смирнов О.И.; Раскутин А.Е.

**Система испытания ПКМ в рамках жизненного цикла продукции106**

Федотов Л.В. ; Оленев А.А.; Калугина Е.А.

**Современные щелочестойкие эпоксидные составы и композиты на их основе для применения в строительной области ..... 111**

Астахов П.А.; Шаронов А.В.

УДК 624.011.78

## **Исследование болтовых соединений элементов из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП)**

Кузнецов И.Л.<sup>1</sup>, д.т.н.; Фахрутдинов А.Э.<sup>1</sup>, к.т.н.; Арипов Д.Н.<sup>1</sup>

[kuz377@mail.ru](mailto:kuz377@mail.ru); [faxrutdinoff@yandex.ru](mailto:faxrutdinoff@yandex.ru); [architector-1992@mail.ru](mailto:architector-1992@mail.ru)

<sup>1</sup>*Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)*

### ***Аннотация:***

*Работа посвящена вопросам проектирования болтовых соединений элементов из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП), работающих на сдвиг. Приводятся результаты расчетов, экспериментальных исследований, конструирования одноболтового соединения элементов из ПСП. Приводятся результаты сравнения различных норм на основе расчета и конструирования одноболтового соединения элементов из ПСП.*

### ***Ключевые слова:***

*пултрузия, стеклопластиковый профиль, болтовые соединения, несущая способность.*

Массовое применение пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) в России началось сравнительно недавно, но ежегодно набирает обороты, находя положительные отзывы у производителей и потребителей стеклопластиковых изделий.

Основными преимуществами профилей из пултрузионного стеклопластика являются: прочность, высокая устойчивость к коррозии и агрессивной химической среде, легкий вес, долговечность, устойчивость к перепадам температур и ультрафиолетовым излучениям [1]. Вместе с тем, их применение сдерживается рядом факторов, среди которых – отсутствие утвержденной нормативной базы по расчету и конструированию ПСП.

Одной из проблем при разработке конструкций из ПСП является обеспечение требуемой прочности соединений элементов. Узловые соединения элементов конструкций из ПСП в большинстве случаев выполняются болтовыми [1].

Проектирование болтовых соединений элементов из ПСП более сложный процесс, чем в случае стальных конструкций [2]. Причинами являются многообразие возможных форм разрушения и критериев, определяющих несущую способность, различные механические свойства материала в зависимости от направления и условий работы элемента.

В рамках данной статьи приводятся результаты сравнения различных норм [3, 4] с позиции несущей способности соединений элементов из ПСП. Результаты сравнения «Руководство по проектированию и расчету строительных конструкций из пултрузионных стеклопластиковых профилей производства ООО «Татнефть-Пресскомполит» [3] и «Pre-Standard for LRFD of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures, ASCE» [4] приведены в табл. 1. Сравнение норм направлено, в частности, на выявление путей снижения расхода материала несущих конструкций из ПСП.

Анализ существующих норм [3-4] показывает, что смятие является единственным вариантом отказа, не приводящим к внезапному разрушению конструкций [5].

Авторами статьи рассмотрен вариант одноболтового соединения (Рис. 1), минимальные размеры которого подбирались таким образом,

чтобы критерием отказа являлось смятие. Узел соединения «нахлесточного» типа (Рис. 1) состоит из ПСП листов толщиной 10 мм, стальных болтов класса 5.6 диаметром 10 мм. Отверстие под болт принят равным 11 мм, диаметр шайб – 20 мм согласно [3-4].

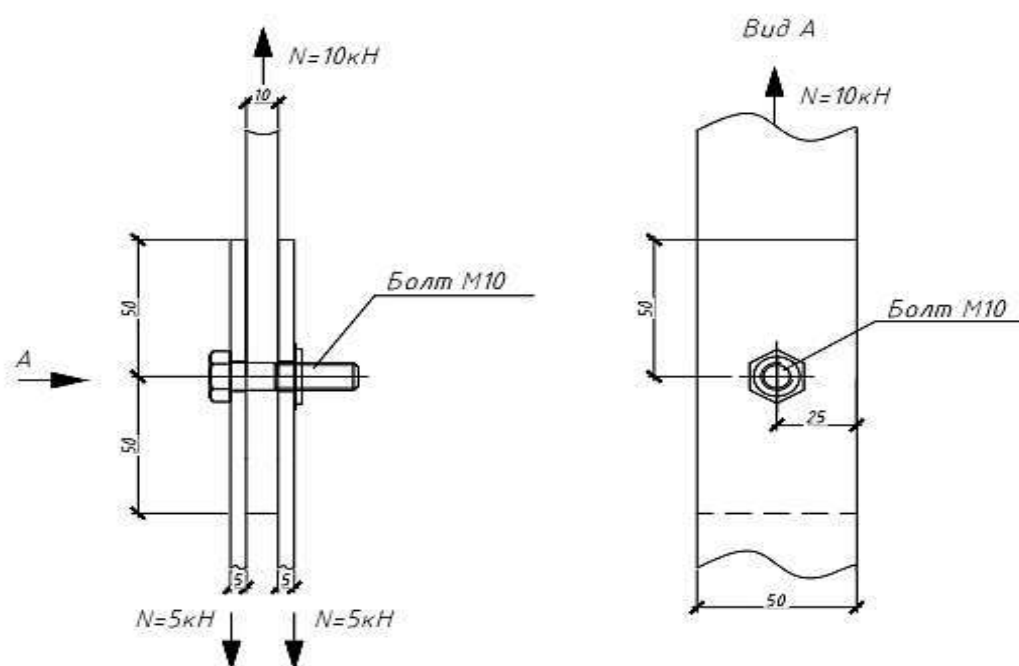


Рис. 1 – Одноболтовое соединение элементов из ПСП

Как видно из табл.1, основную роль в формуле для определения несущей способности материала профилей на смятие играет расчетное сопротивление на смятие, которое зависит от направления пултрузии по отношению к усилию. При этом, согласно [3-4], значение расчетного сопротивления принимается в зависимости от угла направления пултрузии. Так, при  $0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$  расчетное сопротивление принимается равным  $R_{bp,L}^p [F_L^{br}]$ , то есть как при  $0^\circ$ ; а при  $5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  принимается равным  $R_{bp,T}^p [F_T^{br}]$ , как при  $90^\circ$ . При этом промежуточные значения от  $5^\circ$  до  $90^\circ$  не используются.



Таблица 1

Результаты сравнения расчета несущей способности одноболтового соединения

№ п/п	Наименование критерия	Согласно [2]	Согласно [3]	Примечания
<p>Расчёт болтовых соединений производится исходя из следующих условий:</p> <p>1) температура эксплуатации – 30 °С;</p> <p>2) срок службы – 25 лет;</p> <p>3) относительная влажность воздуха – от 60% до 75%.</p>				
1.	Несущая способность болтовых соединений при работе болтов на срез, принимается наименьшее из:	$S_{нec} = \min\{nS_{bp}; S_{nt}; S_{LT}; S_{cl}\}$	$R_u = \min\{R_{br}; R_{nt}; R_{sh}; R_{cl}\}$	
2.	Несущая способность материала профилей на смятие:	<p><math>S_{bp} = dtR_{bp,\theta}^p = 1 \cdot 1 \cdot 4,81 = 4,81 \text{ кН}</math>,  где <math>d = 1 \text{ см}</math> – номинальный диаметр болта;  <math>t = 1 \text{ см}</math> – толщина элемента профиля в соединении;</p> <p><math>R_{bp,L}^p = \frac{R_{bp,L}^H}{\gamma_m} \cdot m_{дл} \cdot m_{дин} \cdot m_T \cdot m_w =</math>  <math>\frac{15}{1,25} \cdot 0,5 \cdot 0,89 \cdot 0,9 = 4,81 \text{ кН/см}^2</math>,  где <math>R_{bp,\theta}^H = 15 \text{ кН/см}^2</math> – предел прочности на смятие в направлении <math>0^\circ</math>; <math>\theta = 0^\circ &lt; 5^\circ</math>.  <math>\gamma_m = 1,25</math> – коэффициент надежности по материалу;  <math>m_{дл} = 0,5</math> – коэффициент условий работы, учитывающий нагруженность конструкции;  <math>m_{дин} = 1</math> – коэффициент условий работы, учитывающий динамические нагрузки;</p>	<p><math>R_{br} = \lambda \phi t d F_\theta^{br} = 0,4 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 15 \cdot 0,8 = 3,84 \text{ кН}</math>  где <math>\lambda = 0,4</math> – коэффициент длительности нагрузки;  <math>\phi = 0,8</math> – коэффициент надежности сопротивления.</p>	Несущая способность материала профилей на смятие, определенная по [2] в 1,25 раза выше значения определенного по [3].

№ п/п	Наименование критерия	Согласно [2]	Согласно [3]	Примечания
		<p><math>m_T = 0,89</math> – коэффициент условий работы, учитывающий влияние температуры;</p> <p><math>m_w = 0,9</math> – коэффициент условий работы, учитывающий снижение свойств материала под влиянием влажности.</p>		
3.	Несущая способность материала профилей на растяжение:	$S_{nt} = \frac{mw - nd_n tR_{L,0}^p}{K_{nt}} =$ $\frac{1 \cdot 5 - 1 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 12,18}{3} = 15,83 \text{ кН,}$ <p>где <math>w = 2 \cdot e_2 = 2 \cdot 2,5 = 5 \text{ см}</math>, так как <math>\frac{n}{m} = 1</math>;</p> <p><math>n = 1</math> – количество болтов в соединении;</p> <p><math>m = 1</math> – количество рядов в соединении;</p> <p><math>d_n = 1,1 \text{ см}</math> – номинальный диаметр отверстия под болт;</p> <p><math>R_{L,L}^p = 12,18 \text{ кН/см}^2</math> – расчётное сопротивление материала профилей на растяжение в направлении <math>0^\circ</math>;</p> $K_{nt} = 0,5 \cdot 5 - 1,5 \cdot \frac{5-1}{5+1} \cdot 1 + 1 = 3.$	$R_{nt} = \lambda \varphi \frac{1}{K_{nt,L}} (w - nd_n) t F_L^t = 0,4 \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{3} \cdot 5 - 1 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 38 \cdot 0,8 = 7,9 \text{ кН.}$	Несущая способность материала профилей на растяжение, определенная по [2] в 2,00 раза выше значения определенного по [3].
4.	Несущая способность материала профилей на срез:	$S_{LT} = 2 \frac{n}{m} e_1 + m - 1 s t R_{sh,int}^p =$ $2 \cdot \frac{1}{1} \cdot 5 \cdot 1 \cdot 0,8 = 8 \text{ кН,}$ <p>где <math>e_1 = 5 \text{ см}</math> – расстояние от торца элемента до оси ближайшего</p>	$R_{sh} = 1,4 \lambda \varphi (e_1 - \frac{d_n}{2}) t F_{sh} =$ $1,4 \cdot 0,4 \cdot 0,8 \cdot 5 - \frac{1,1}{2} \cdot 1 \cdot 2,5 = 3,96 \text{ кН.}$	Несущая способность материала профилей на срез, определенная по [2] в 2,24 раза выше значения

№ п/п	Наименование критерия	Согласно [2]	Согласно [3]	Примечания
		отверстия под болт; $s = 0$ – шаг между рядами болтов в соединении; $R_{sh,int}^p = 0,8 \text{ кН/см}^2$ – расчётное значение предела прочности при межслойном сдвиге в направлении $0^\circ$ ;		определенного по [3].
5.	Несущая способность материала профилей при скальвании:	$S_{cl} = 0,15t((2e_2 - d_n) R_{t,L}^p + 2e_1 R_{sh,int}^p = 0,15 \cdot 1((2 \cdot 2,5 - 1,1) \cdot 12,18 + 2 \cdot 5 \cdot 0,8) = 8,33 \text{ кН}$	Согласно разделу 8.3.2.6. при $\frac{e_1}{d} \geq 4$ , $R_{cl} = R_{br}$ . $\frac{5}{1} > 4$ $R_{cl} = R_{br} = 0,4 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 15 \cdot 0,8 = 3,84 \text{ кН}$ .	Несущая способность материала профилей при скальвании, определенная по [2] в 2,17 раза выше значения определенного по [3].

Авторами статьи было предположено, что расчетное сопротивление на смятие в интервале от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  по направлению пултрузии меняется по определенному закону и имеет промежуточные значения.

Схема экспериментальных образцов для испытаний представлена на рисунке 2. Данный образец состоит из металлического захвата и листа пултрузии, имитирующих работу одноболтового соединения. Размеры пултрузионного листа были приняты согласно нормативным документам [3-4], удовлетворяя требованиям по минимальным расстояниям. Семь образцов имели одинаковую геометрическую форму при этом направление пултрузии в них менялось от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $15^\circ$  (Рис. 3).

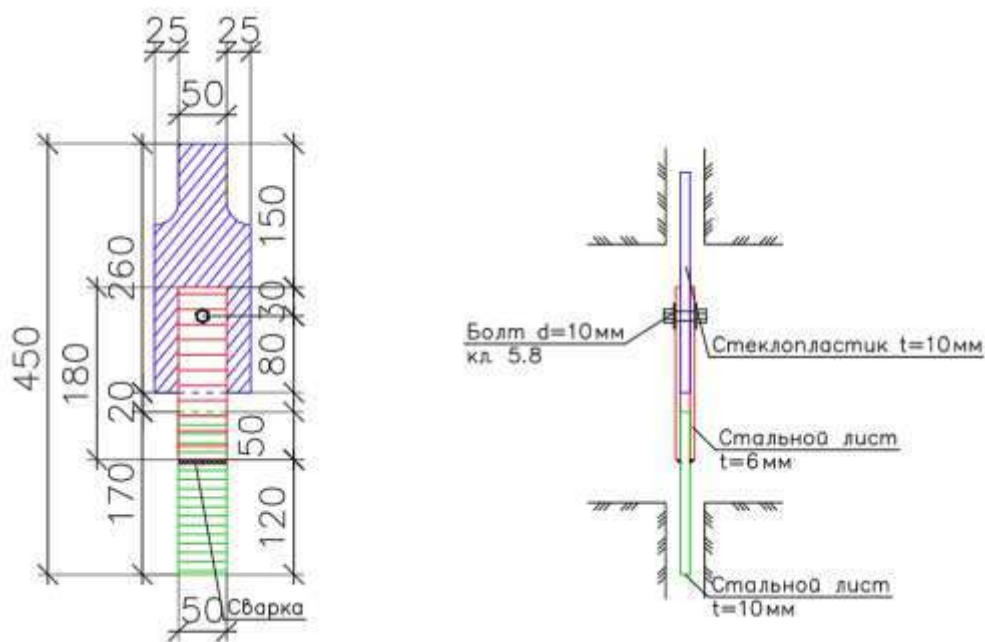
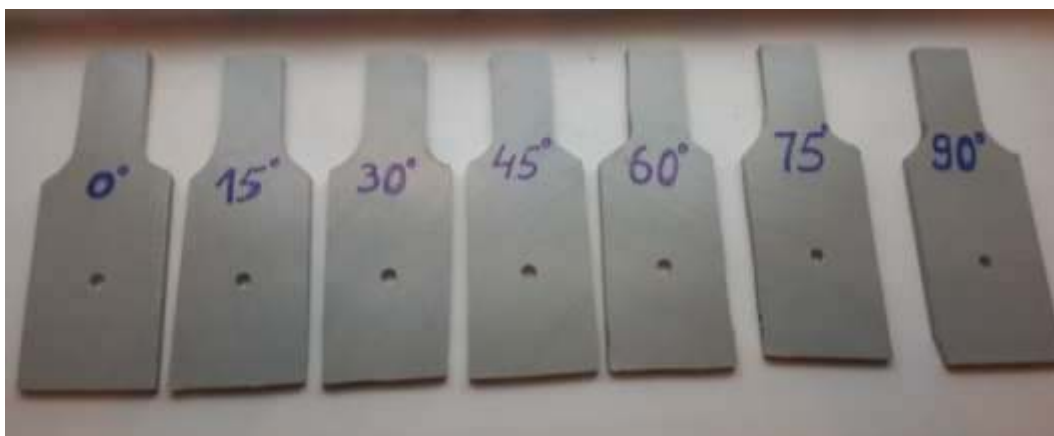


Рис. 2 – Узел для испытания одноболтового соединения

А



Б



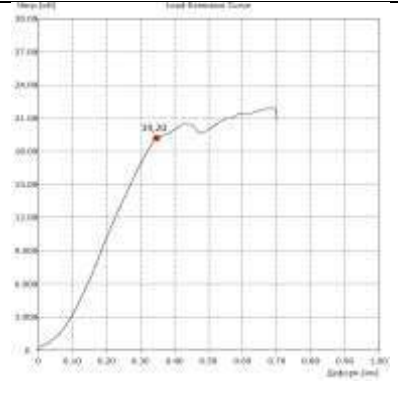
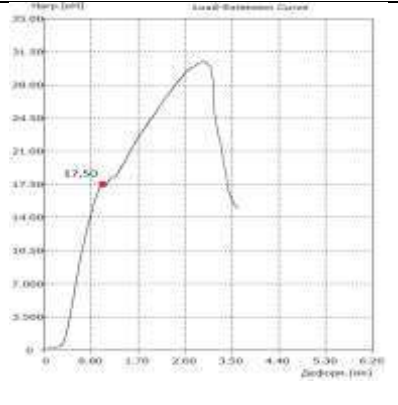
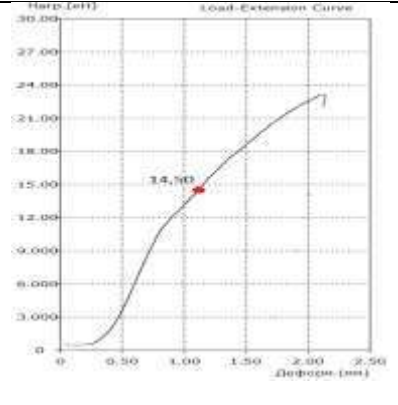
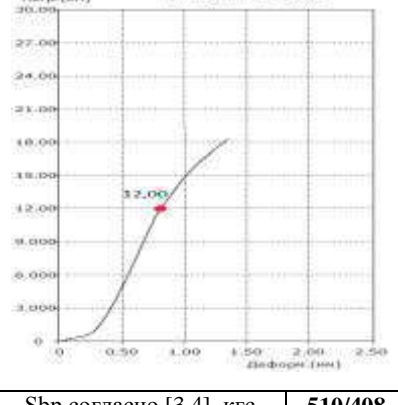
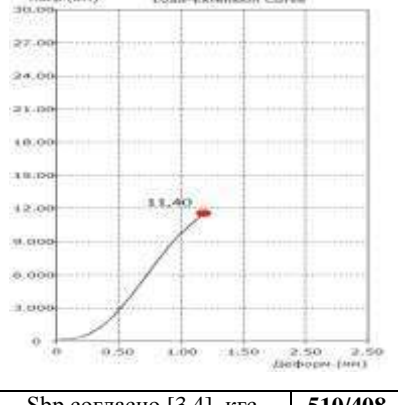
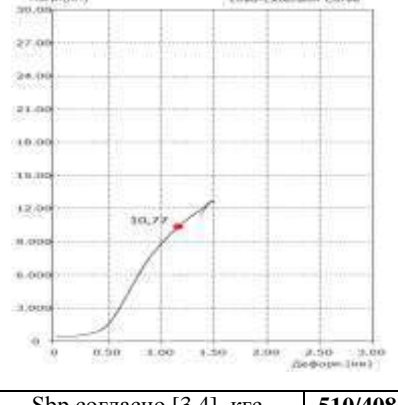
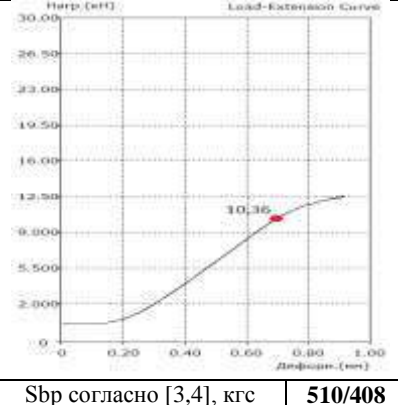
Рис. 3 – Образцы для проведения испытаний:  
А – до проведения испытаний; Б – после проведения испытаний

Экспериментальные исследования были проведены с использованием универсальной машины марки ИР 5082-200. Для определения и оценки деформаций соединения был использован навесной экстензометр с базой 50 мм. После испытания образцов были получены графики зависимости деформаций в соединении от прикладываемого усилия.

В табл. 2 приведены результаты испытаний и расчет несущей способности на смятие согласно [3-4].

Таблица 2

Результаты испытаний

0°		15°		30°	
					
S <sub>br</sub> согласно [3,4], кгс	<b>1224/979</b>	S <sub>br</sub> согласно [3,4], кгс	<b>510/408</b>	S <sub>br</sub> согласно [3,4], кгс	<b>510/408</b>
S <sub>br</sub> (Экспериментальные данные), кгс	<b>1920</b>	S <sub>br</sub> (Экспериментальные данные), кгс	<b>1750</b>	S <sub>br</sub> (Экспериментальные данные), кгс	<b>1450</b>
45°		60°		75°	
					
S <sub>br</sub> согласно [3,4], кгс	<b>510/408</b>	S <sub>br</sub> согласно [3,4], кгс	<b>510/408</b>	S <sub>br</sub> согласно [3,4], кгс	<b>510/408</b>
S <sub>br</sub> (Экспериментальные данные), кгс	<b>1200</b>	S <sub>br</sub> (Экспериментальные данные), кгс	<b>1140</b>	S <sub>br</sub> (Экспериментальные данные), кгс	<b>1077</b>
90°					
					
S <sub>br</sub> согласно [3,4], кгс	<b>510/408</b>				
S <sub>br</sub> (Экспериментальные данные), кгс	<b>1036</b>				

### **Выводы:**

1) При расчете болтовых соединений согласно нормам [3, 4] применяются подобные формулы. Значения несущей способности, определенные по [3], в 1,25–2,24 раза выше значений, определенных по [4].

2) Результаты экспериментальных исследований показали, что несущая способность одноболтового соединения на смятие при изменении угла от 0° до 90° по направлению пултрузии имеет промежуточное значение, отличное от [3,4]. Испытания показали, что для угла 0° фактическая нагрузка превышает минимальную расчетную на 57%.

### Литература

1. Фахрутдинов А.Э., Арипов Д.Н. Несущие конструкции сооружений из пултрузионных стеклопластиковых профилей // II Всероссийская научно-техническая конференция «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». 2017. С. 281–294.

2. Turvey G.J., Wang P. Failure of Pultruded GRP Single-bolt Tension Joints in Pultruded GRP plate // Composite Structures. 2007. С. 509–513.

3. Руководство по проектированию и расчету строительных конструкций из пултрузионных стеклопластиковых профилей производства ООО «Татнефть-Пресскомполит». ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Москва, 2016 – 99 с.

4. Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures. American Composites Manufacturers Association (ACMA), 2010 – 215 с.

5. Mottram J.T., Turvey G.J. Physical Test Data for the Appraisal of Design Procedures for Bolted Joints in Pultruded FRP Structural Shapes and Systems // Progress in Structural Engineering and Materials. 2003. С. 195–222.

УДК 678.8

## **Опыт применения вакуум-инфузионных технологий в производстве конструкций из ПКМ**

Вешкин Е.А.<sup>1</sup>, к.т.н.; Постнов В.И.<sup>1</sup>, д.т.н.;

Постнова М.В.<sup>1</sup>, к.т.н.; Баранников А.А.<sup>1</sup>

[untcviam@viam.ru](mailto:untcviam@viam.ru)

<sup>1</sup>*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)(УНТЦ ВИАМ)*

### ***Аннотация:***

*Внедрение новых технологий и связующих в производство высокотехнологичных конструкций из композиционных материалов для авиационной и машиностроительной областей.*

### ***Ключевые слова:***

*вакуумная инфузия, связующее, стеклопластик, углепластик, преформа.*

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря комплексу уникальных свойств нашли широкое применение не только в авиационной технике [1–6], но так же в судостроении, автомобилестроении и мостостроении. Существует множество методов переработки этих материалов в изделия различных размеров, конфигурации и назначения. Среди них особое внимание привлекает использование технологий изготовления деталей из ПКМ способом



закрытого безавтоклавного формования полимерных композиционных материалов методами пропитки под вакуумом и давлением [7] и инфузии [8]. Эти технологии позволяют значительно повысить производительность и мобильность серийных производств, сократить затраты на прессовое и автоклавное оборудование.

В последнее время широкое распространение получила технология вакуумной инфузии, в связи с ее использованием в производстве центроплана и панелей крыла самолета МС-21 [9, 10]. Для реализации данной технологии собранный пакет углеродного наполнителя укладывается на оснастку, далее он накрывается жертвенной тканью или перфорированной пленкой, поверх которых помещается распределительная сетка. Затем собирается вакуумный мешок и производится пропитка пакета наполнителем связующим, подаваемым через питающие трубки из ёмкости, которая происходит за счёт разряжения в вакуумном мешке (рис. 1)

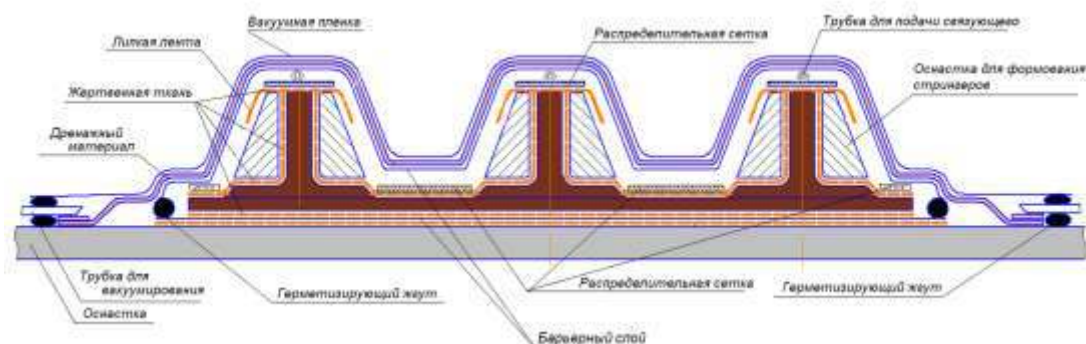


Рис.1 – Схема сборки технологического пакета для вакуумной инфузии [9]

Однако наряду с преимуществами у этой технологии есть некоторые недостатки: отсутствие возможности точного контролирования содержания связующего по всей площади будущего изделия, невозможность получения высокого качества поверхности со стороны подачи связующего из-за наличия отпечатка распределительной сетки на поверхности и отсутствие возможности использования цулаги, высокие требования к герметичности вакуумного мешка. Несмотря на это, вакуумный инфузионный метод активно применяется в авиационной и судостроительной промышленности для изготовления конструкций из ПКМ.

Для изготовления деталей с помощью инфузионной технологии используются термореактивные полимерные связующие [11, 12], которые должны обладать следующим комплексом технологических свойств:

- длительной жизнеспособностью в период хранения перед технологической стадией пропитки детали. Это может достигаться за счет использования двухкомпонентных полимерных композиций (полимерная составляющая/отвердитель);
- невысокой исходной вязкостью композиции и увеличенным интервалом технологической жизнеспособности, способствующему быстрому проведению процесса и снижению пористости готового изделия;
- гомогенностью полимерной композиции, обеспечивающей легкую пропитку без эффектов отфильтровывания гетерогенной составляющей волокнистым материалом угле- или стеклонаполнителя;
- коротким режимом формообразования и сравнительно невысокой температурой доотверждения, что является необходимым условием для обеспечения высокой энергоэффективности процесса получения деталей из ПКМ по данной технологии.

В ФГУП «ВИАМ» для данных технологий были разработаны и внедрены в конструкции из ПКМ различного назначения связующие (табл.1) [12–14].

Таблица 1

Связующие применяемые для инфузионных технологий

Марка и тип связующего	Температура стеклования, T <sub>g</sub> , °C	Технология переработки в изделие	Основные свойства	Области применения
ВСЭ-20 (эпоксидное)	175	RFI	ε до 3%, σ <sub>в</sub> =80 МПа, жизнеспособность 14 суток	Крупногабаритные слабо и средненагруженные конструкции
ВСЭ-21 (эпоксидное)	150	Инфузия	Вязкость менее 0,15Па·с, σ <sub>в</sub> >70 МПа, жизнеспособность 1 год	Крупногабаритные слабо и средненагруженные конструкции
ВСЭ-17 (эпоксидное)	210	RTM, VaRTM	Вязкость менее 0,15Па·с, σ <sub>в</sub> >70МПа, жизнеспособность 14 суток	3D армированные детали сложной пространственной формы
ВСЭ-30 (эпоксидное)	110	Инфузия	Вязкость менее 1Па·с, σ <sub>н</sub> >120МПа,	Биаксиальноплетеные пресс-формы
ВСТ-1210 (цианоэфирное)	250	RTM, VaRTM, инфузия	Вязкость менее 0,2Па·с, σ <sub>в</sub> >85МПа, жизнеспособность 30 суток	3D армированные детали сложной пространственной формы
ВСВ-41 (эпоксивинил-эфирное)	80	Инфузия	Вязкость менее 0,3Па·с, σ <sub>н</sub> =115МПа, E <sub>н</sub> =3,2ГПа	3D армированные детали сложной пространственной формы
ВСВ-43 (эпоксивинил-эфирное)	102	Инфузия	Вязкость менее 0,4Па·с, σ <sub>н</sub> =120МПа, E <sub>н</sub> =3,3ГПа	3D армированные детали сложной пространственной формы

Представленные в таблице 1 связующие достаточно широко использованы в разработке и изготовлении различных конструктивных элементов из ПКМ для авиационной техники.

Так на основе инфузионного связующего ВСТ-1210 и углеродной ткани Porcher арт. 3692 был разработан углепластик ВКУ-48 обладающий хорошими прочностными свойствами, не горючий, грибостойкий. Он может применяться в контакте с титановыми сплавами и нержавеющей стали.

Способом вакуумной инфузии из связующего ВСТ-1210 и углеродной ткани Porcher арт. 3692 была изготовлена деталь крышки капота двигателя вертолёта КА-226Т с пористостью готового пластика ВКУ-48 менее 1,0% (рис. 2).



Рис. 2 – Крышка капота из углепластика ВКУ-48

Методом инфузии – на основе углеродной ткани арт. 3673 ф. «Porcher» и связующего ВСЭ-21 с использованием стеклопластиковой оснастки изготовлена нижняя панель обтекателя реактивного учебно-тренировочного самолёта СР-10 с пористостью 0,4% (рис 3) [8].



Рис. 3 – Общий вид обтекателя

В процессе отработки технологии вакуумной инфузии было установлено, что несмотря на кажущуюся простоту, этот метод имеет ряд особенностей требующих тщательного исполнения:

1. Перед пропиткой связующее должно быть отвакуумировано для

- удаления низкомолекулярных компонентов, во избежание их вскипания;
2. Необходимо наличие при формовании вспомогательных материалов (вакуумные пленки, вакуумные шланги, разделительные пленки, жертвенные ткани, дренажные ткани, герметизирующие жгуты, порты подачи связующего, распределительные среды и т.д.);
  3. Необходимо обеспечить давление вакуума  $0,95 \text{ кг/см}^2$  и выше на протяжении всего процесса инфузии и отверждения (разгерметизация может привести к браку изделия);
  4. Для исключения не пропитанных зон пакета наполнителя в процессе инфузии, необходимо обеспечение градиента давления в связующем на всем протяжении пути пропитки

Соблюдение данных условий позволяет создавать низкопористые и высоконаполненные композиционные материалы конструкционного назначения методом вакуумной инфузии. Технология получения ПКМ методом вакуумной инфузии находит свою нишу как в авиастроении, так и активно начинает применяться в судостроении и строительной отрасли.

Реализуя пилотный инновационный проект ФГУП ВИАМ при поддержке Минпромторга, разработал и построил автомобильный мост из углепластиковых арочных элементов и стеклопластикового настила изготовленных с помощью вакуумной инфузии [15].

Для строительства данного моста были использованы углепластиковые и стеклопластиковые конструкции с разработанным новым низковязким эпоксивинилэфирным связующим холодного отверждения марки ВСВ-43 [16]. На его основе получены углепластик марки ВКУ-51 и стеклопластик ВПС-58 (рис. 4).



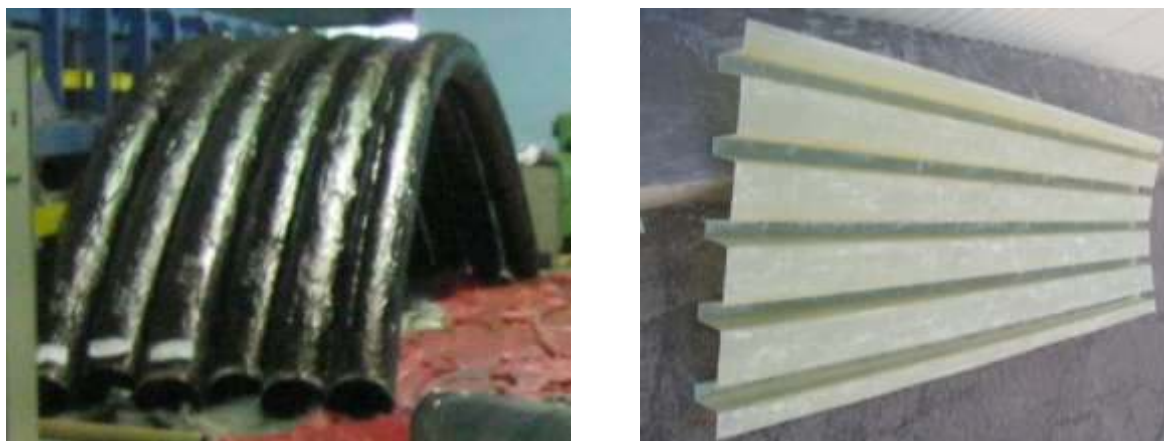


Рис. 4 – Готовые арочные элементы из углепластика ВКУ-51 и профилированный настил из стеклопластика ВПС-58

В связи с тем, что связующее ВСВ-43 обладает коротким времени гелеобразования, были разработаны новые схемы пропитки арочного элемента и профилированного настила. Новая схема пропитки арочного элемента предполагает, что по всей длине арочного элемента располагается спиральная трубка подачи связующего, которая на концах изделия оборачивается по её окружности. Таким образом, фронт распространения связующего в процессе пропитки распределяется не локально по отдельным областям, а охватывает всю длину арочного элемента и распределялся по длине окружности изделия равномерно. При такой схеме пропитка всей детали происходит за 20–25 минут.

Для оптимизации технологии пропитки профилированного настила, была предложена схема, при которой вместо 1 точки подачи связующего на поверхности настила размещалось 5 точек. Для этого на сухой стеклянный наполнитель была уложена распределительная лента, на которой дополнительно были установлены 4 канала подачи связующего, что позволило ускорить процесс инфузии и сократить время пропитки до 2 часов. Применяя дополнительное количество распределительных лент можно добиться ещё большего ускорения процесса инфузии и сокращения времени пропитки. Однако, для связующего ВСВ-43 такой скорости

пропитки достаточно и необходимости в использовании дополнительного количества ленты нет.

Для оптимизации технологии изготовления профилированного листа стеклопластикового настила была спроектирована сборно-разборная многоразовая технологическая оснастка (ТО) (рис. 5), с помощью которой возможно изготовление 2 листов профилированного настила за рабочую смену.



Рис. 5 – Многоразовая оснастка

Пропитка осуществлялась при комнатной температуре через центральный литник, затем по мере пропитывания пакета поочередно подключались другие литники. Технологический процесс пропитки изображен на рис. 6.



Рис. 6 – Пропитка пакета-заготовки

После пропитки, заготовка вместе с оснасткой помещается в печь и отверждается по заданному режиму. Готовый профилированный настил представлен на рис. 7.



Рис. 7 – Готовый профилированный настил

Для исследования влияния эксплуатационных факторов на свойства углепластика и стеклопластика были изготовлены образцы из панелей, изготовленных по серийной технологии. Образцы углепластика были выставлены на экспозицию при  $T=60^{\circ}\text{C}$  и  $\phi=85\%$  в течение 30 суток, проведены испытания на растяжение при комнатной ( $20^{\circ}\text{C}$ ) температуре. Данный вид испытаний был выбран в связи с тем, что влиянием эксплуатационных факторов в большей степени подвержена полимерная матрица, поэтому при подготовке, образцы вырезались поперек волокон. Испытания показали, что образцы углепластика имеют одинаковые показатели до и после экспозиции и равны  $\sigma_{\text{в}}=270$  МПа,  $E=70$  ГПа. Данные условия являются наиболее сложными для углепластиков, и тот факт, что влияния на полимерную матрицу эксплуатационные факторы не оказывают является свидетельством того, что углепластик марки ВКУ-51 пригоден для использования в различных климатических зонах.

На основе инфузионного связующего холодного отверждения ВСВ-41 был разработан стеклопластик марки ВПС-60Р, который обладает повышенной влаго- и химстойкостью и может быть использован для изготовления конструкций работающих в условиях повышенной



влажности и в агрессивных средах. Из данного материала методом вакуумной инфузии был изготовлен композитный шпунт круглого сечения и корытного типа (шпунт Ларсена) (рис.8).



Рис. 8 – Композитные шпунты (круглого сечения на основе плетеного рукава (диаметром до300 мм), и корытного типа (шпунт Ларсена) на основе равнопрочной стеклоткани)

#### Области применения:

– машиностроение, при изготовлении элементов оборудования нефтехимической и химической промышленности (в том числе для защитной футеровки), баков и насосов для перекачки кислот, вентиляционного оборудования и т.д.

– строительство, для изготовления элементов шпунтовых ограждений, элементов водоотбойных систем, мостостроении, лотков водослива и др.

#### Использование композитных шпунтов позволило:

– снизить затраты на транспортировку конструктивных элементов шпунтовых ограждений (шпунтовой элемент может изготавливаться в непосредственной близости от строительной площадки),

– сократить сроки возведения шпунтовые ограждения и количество применяемой тяжёлой строительной техники (шпунтовой элемент имеет низкий вес),

– увеличить срок эксплуатации.

Таким образом, разработка новых связующих для угле- и стеклопластиков и реализация в них инфузионных технологий позволило

ФГУП «ВИАМ» в короткие сроки освоить серийные технологии получения арочных элементов и настилов из ПКМ, а так же использовать их при строительстве моста в п. Языково Ульяновской области (рис. 9).



Старый мост



Новый мост

Рис. 9 – Мост, изготовленный с применением ПКМ

Надежность вновь построенного моста подтверждается длительным сроком эксплуатации в условиях интенсивного автомобильного воздействия при различных погодных условиях.

Результаты апробации показали, что разработанные технологии позволяют получать методом инфузии детали различных по геометрии и размерам параметрами для слабо- и средненагруженных элементов конструкций из ПКМ, как для применения в авиации, так и в машиностроительных отраслях.

#### 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. С. 3-33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.

3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки - основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.

4. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2014. № 4. Ст. 6. (дата обращения 05.12.2017). dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.

5. Хрульков А.В., Григорьев М.М., Язвенко Л.Н. Перспективы внедрения безавтоклавных технологий для изготовления конструкционных материалов (обзор). Труды ВИАМ. №2(38). 2016. С. 45–52.

6. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н., Усачева М.Н. Композиционные материалы для безавтоклавной технологии (обзор). Труды ВИАМ. №3(63). 2018. С. 37–48.

7. Веселов С.И., Карташов Г.Г. Композиционные материалы в авиадвигателестроении // Учебное пособие. Куйбышев. КуАИ. 1986. 122 с.

8. Коган Д.И., Душин М.И., Борщёв А.В., Вешкин Е.А., Абрамов П.А., Макрушин К.В.. Свойства конструкционных углепластиков, изготовленных пропиткой под вакуумом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т.14. №4(2). 2012.С. 762–766.

9. [http://aviationunion.ru/Files/Nom\\_4\\_AeroKompozit.pdf](http://aviationunion.ru/Files/Nom_4_AeroKompozit.pdf)

10. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолётов семейства МС-21. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т.14. №4(2). 2012.С. 686–693.

11. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Терехов И.В., Донецкий К.И. Терморезистивные связующие и полимерные биндеры для полимерных композиционных материалов, получаемых методом вакуумной инфузии (обзор) // Пластические массы. 2018. №1-2. С. 57–64.

12. Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Григорьев М.М., Чурсова Л.В., Бабин А.Н. Связующие для безавтоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. №10. 2013. С. 18–27.

13. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Рубцова Е.В., Петрова А.П. Исследование эпоксидно-полисульфоновых полимерных систем на основе высокопрочных клеев авиационного назначения // Клеи. Герметики. Технологии, 2017. №3. С. 7–12.

14. Чурсова Л.В., Гребенева Т.А., Панина Н.Н., Цыбин А.И. Связующие для полимерных композиционных материалов строительного назначения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015 № 8. С. 13–17.

15. Мишкин С.И., Раскутин А.Е., Евдокимов А.А., Гуляев И.Н. Технологии и основные этапы строительства первого в России арочного моста из композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2017. №6. Ст.5. (дата обращения 05.12.2017). [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5).

16. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е. Применение полимерных композиционных материалов строительных конструкциях. Труды ВИАМ. №8. 2013.

УДК 621.37

## **Применимость радиоволновых методов для испытаний и диагностики композитов авиационного назначения для вновь запускаемых изделий**

Дмитриенко Г.В.<sup>1</sup>, д.т.н.; Ривин Г.Л.<sup>1</sup>, к.т.н.

[dmitrienko.german@yandex.ru](mailto:dmitrienko.german@yandex.ru)

<sup>1</sup>ИАТУ УлГТУ, г. Ульяновск

### **Аннотация:**

*Статья посвящена применимости радиоволновых методов испытаний и диагностики композитов авиационного назначения для вновь запускаемых изделий. Рассматривается описание процесса измерения и методом интегральных уравнений.*

### **Ключевые слова:**

*Полимерные композиционные материалы, углепластики, диэлектрическая проницаемость.*

### **Используемые обозначения и термины:**

КМ – композиционных материалов,

НКМ – низкоимпедансные композиционные материалы,

НК – разрушающий контроль,

МИУ – метода интегральных уравнений.

## Введение

В последнее время (с 90 гг. прошлого века) появились принципиально новые виды радиопоглощающих конструкционных композиционных материалов (КМ) авиационного назначения, такие как: проводящие полимеры, углеродные нанотрубки, наноструктурные КМ. В электродинамике такие материалы классифицируются как низкоимпедансные. Низкоимпедансные КМ (НКМ) по своим электрическим свойствам относятся к диэлектрическим материалам, которые характеризуются большими значениями относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  одновременно. По технологии изготовления НКМ обладают большим затуханием электромагнитной энергии до 70 дБ/мм по толщине в широком диапазоне частот. Одним из представителей такого класса материалов являются углеродосодержащие материалы – углепластики, по своим электрическим свойствам это диэлектрики, имеющие высокое значение проводимости. Углепластики широко применяются в авиационной технике как конструкционные материалы для создания несущих конструкций, и как радиотехнические материалы: для уменьшения эффективной отражающей поверхности летательных аппаратов, для защиты радиотехнических систем от мощных электромагнитных излучений.

Для отслеживания как в процессе изготовления и контроля готовых изделий авиационного назначения используется не разрушающий контроль (НК). Наиболее информационным методом НК, предлагается использовать радиоволновые методы, в которых информационным параметром будет коэффициент отражения или коэффициент прохождения электромагнитной волны, в зависимости от структуры полимерного материала. Проводящая структура материала – коэффициент отражения. Такой контроль позволяет отслеживать состояние материала по его

электродинамическим характеристикам как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации авиационных изделий из них.

Для повышения точности обработки результатов измерений и контроля характеристик изделия по его диэлектрическим параметрам, применяется более строгий с электродинамической точки зрения математический метод, метода интегральных уравнений (МИУ) [1–5]. Составление интегральных уравнений производится из уравнений Максвелла, используя специальные функции: вектора Герца или векторные потенциалы. МИУ позволяет получить точное решение сложных задач в аналитическом виде МИУ, которые ранее решались приближенными численными методами, особенно применим для тел, имеющих поверхностную проводимость. При численном решении интегральных уравнений широкое распространение получил метод моментов, который дает широкий спектр возможностей для анализа и математического моделирования полученных решений.

Процедура составления интегральных уравнений производится через поверхностные токи, наводимые на поверхности образца НКМ и металлической конструкции волноводного датчика зондирующей электромагнитной волной. Диэлектрические параметры НКМ и характеристики отражающей поверхности задают через поверхностный импеданс. Информационным параметром является отраженная волна, и измерительная задача сводится к задаче о возбуждении круглого волновода токами, наводимыми в НКМ полем падающей волны. Результаты измерений обрабатываются численными методами.

#### *Методика составления интегральных уравнений для тел вращения*

Напряженности электрического и магнитного полей выражается через истокообразные представления для векторных потенциалов которые задаются через возбуждающие токи. Полученные уравнения эквивалентны интегральные уравнения для диэлектрических тел, в которых



электрический ток протекает по поверхности или в скин-слое проводящих тел. Интегрирование производится по поверхности, а не по объему [1]. В общем случае интеграл по поверхности материала (композита)  $\Sigma_1$  является трехкратным по  $R$ ,  $\varphi$  и  $Z$ . Для упрощения вычислительного процесса, делаются некоторые утверждения, которые снижают размерность задачи:

1. Считаем, что электромагнитная волна, проникающая в глубь НКМ перпендикулярна внешней поверхности, и направлена по одной из координатных осей (ось  $Z$ ).

2. В силу правила перестановочной двойственности уравнений Максвелла, следующих из их симметрии, тензорные функции  $\xi^{E,M}$ ,  $h^{E,M}$  связаны между собой следующими выражениями.

$$\begin{aligned} h^E \Phi, q, \varepsilon_a, \mu_a &= -\xi^M \Phi, q, \varepsilon_a, \mu_a \\ h^M \Phi, q, \varepsilon_a, \mu_a &= \xi^E \Phi, q, \varepsilon_a, \mu_a \end{aligned} \quad (1)$$

Используя утверждение, что вектора  $E$  и  $H$  удовлетворяют уравнению Гельмгольца, снижаем размерность уравнений, переход от трехкратного интеграла по поверхности  $\Sigma$  к двукратному интегралу по поверхности  $L$ .

$$E \Phi = \int_L \xi^E \Phi, q, \varepsilon_a, \mu_a \bar{J}^E \Phi + \xi^M \Phi, q, \varepsilon_a, \mu_a \bar{J}^M \Phi \bar{d}l \quad (2)$$

$$H \Phi = \int_L h^E \Phi, q, \varepsilon_a, \mu_a \bar{J}^E \Phi + h^M \Phi, q, \varepsilon_a, \mu_a \bar{J}^M \Phi \bar{d}l \quad (3)$$

Получаем истокообразные уравнения в сжатой форме. Полученные истокообразные уравнения (2, 3) используются для решения задачи по нахождению поля в радиоволновом датчике, и являются исходными уравнениями, для описания взаимодействия электромагнитного поля с образцом НКМ в радиоволновом датчике.

### Многослойные модели НКМ

Модель образца НКМ или ПКМ имеющая шероховатую поверхность (ШП) представляется виде многослойной структуры состоящей из однородных слоев, количество слоев определяется дискретом разбиения по  $\varepsilon$ . Интегральные уравнения для многослойной структуры составляется на



основе уравнений полученных ранее (2) и (3) для каждого слоя, используя обе его границы. Нумерация слоев производится в соответствии с рис.1 и рис. 2. Методика составления интегральных уравнений для многослойной среды производится как для одного слоя, учитывая распределение токов на границах раздела. Сшивка производится по граничным условиям Щукина-Леонтовича т.к. НКМ обладает  $\varepsilon$ ,  $\mu$  – электрической и магнитной проницаемостями и  $\sigma$  - проводимостью. Образец разбит на  $N$  – слоев, их границы не имеют общих точек. В каждом слое могут находиться сторонние источники, нумерация слоев производится по направлению от источника наблюдения в глубь образца НКМ. Составление уравнений производится, для слоев  $K$  и  $K+1$  имеющих общую границу  $\Sigma_K$  используя (2), (3) к  $K$ -му слою применяют теорему эквивалентности. Нормаль на границах поверхностей раздела слоев направлена в сторону первоисточников.

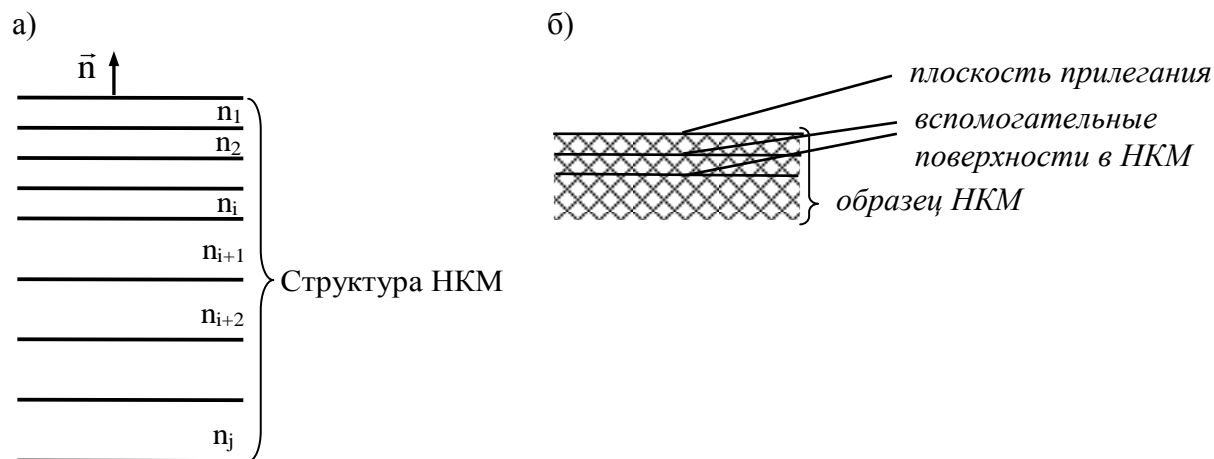


Рис.1 – Многослойные модели НКМ на отражение:

а) – математическая; б) – физическая

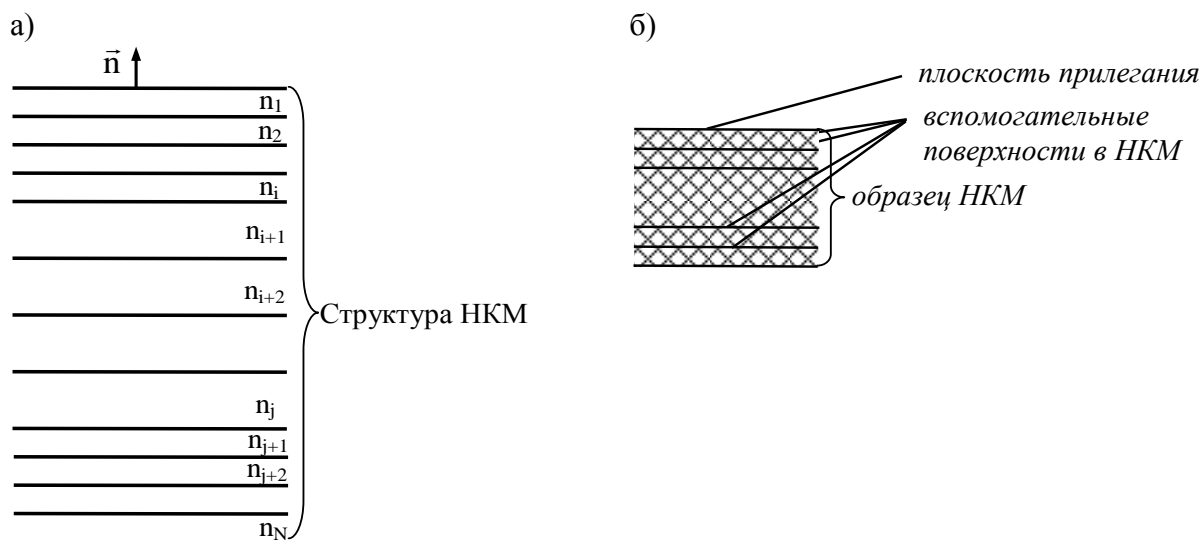


Рис. 2 – Многослойные модели НКМ на прохождение:  
а) – математическая; б) – физическая.

Для К-го слоя уравнения имеют вид:

$$\frac{1}{2} E_K \mathbf{p}^- = \int_{\Sigma_K} \mathbf{J}^E \mathbf{J}_K^E \mathbf{q}^- + \xi^M \tilde{\mathbf{J}}_K^M \mathbf{q}^- \underline{d}\sigma_q + \int_{\Sigma_{K-1}} \mathbf{J}^E \mathbf{J}_{K-1}^E \mathbf{q}^- + \xi^M \tilde{\mathbf{J}}_{K-1}^M \mathbf{q}^- \underline{d}\sigma_q + E_K^H \mathbf{p}^-, p \in \Sigma_K$$

$$\frac{1}{2} H_K \mathbf{p}^- = \int_{\Sigma_K} \mathbf{h}^E \mathbf{J}_K^E \mathbf{q}^- + h^M \tilde{\mathbf{J}}_K^M \mathbf{q}^- \underline{d}\sigma_q + \int_{\Sigma_{K-1}} \mathbf{h}^E \mathbf{J}_{K-1}^E \mathbf{q}^- + h^M \tilde{\mathbf{J}}_{K-1}^M \mathbf{q}^- \underline{d}\sigma_q + H_K^H \mathbf{p}^-, p \in \Sigma_K \quad (4)$$

Интегральные уравнения составлены в матричной форме для слоя К, аналогично записываются для слоя К+1, интегралы берутся по поверхностям  $\Sigma_K$  и  $\Sigma_{K+1}$  как (4).

$$\frac{1}{2} E_{K+1} \mathbf{p}^- = \int_{\Sigma_{K+1}} \mathbf{J}^E \mathbf{J}_{K+1}^E \mathbf{q}^- + \xi^M \tilde{\mathbf{J}}_{K+1}^M \mathbf{q}^- \underline{d}\sigma_q + \int_{\Sigma_K} \mathbf{J}^E \mathbf{J}_K^E \mathbf{q}^- + \xi^M \tilde{\mathbf{J}}_K^M \mathbf{q}^- \underline{d}\sigma_q + E_{K+1}^H \mathbf{p}^-, p \in \Sigma_{K+1}$$

$$\frac{1}{2} H_{K+1} \mathbf{p}^- = \int_{\Sigma_{K+1}} \mathbf{h}^E \mathbf{J}_{K+1}^E \mathbf{q}^- + h^M \tilde{\mathbf{J}}_{K+1}^M \mathbf{q}^- \underline{d}\sigma_q + \int_{\Sigma_K} \mathbf{h}^E \mathbf{J}_K^E \mathbf{q}^- + h^M \tilde{\mathbf{J}}_K^M \mathbf{q}^- \underline{d}\sigma_q + H_{K+1}^H \mathbf{p}^-, p \in \Sigma_{K+1} \quad (5)$$

Для получения возбуждаемых токов на поверхности уравнение (4) домножаются векторно на нормаль и на  $\varepsilon_{K+1}$ , а (5) – на нормаль и  $\varepsilon_K$ , затем уравнения (4) и (5) складываются.

В процессе описания ШП  $\varepsilon$  будет меняться от слоя к слою, внутри образца НКМ  $\varepsilon$  будет постоянна. Интегральные уравнения внутри слоя будут иметь упрощенный характер. В описании процесса на отражение

можно заменить внутреннюю структуру одним слоем, и в описании нахождение также можно заменить на один слой конечной толщины.

Составление интегральных уравнений производится для каждого слоя, для границ  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_{N+1}$  интегральные уравнения отсутствуют, как и сами границы. На внешних границах образца НКМ действует граничные условия Щукна-Леонтовича. Внутри НКМ производится сшивка уравнений.

МИУ применим к для измеряемых образцов НКМ с гладкой рабочей поверхностью, с математической точки зрения точен. С электродинамической точки зрения отраженная волна несет информацию не только о параметрах материала, а так же о характеристиках (геометрии) отраженной поверхности. МИУ для контроля НКМ с ШП имеет методическую неопределенность, поэтому необходимо использовать уточненную математическую модель, учитывающая ШП НКМ. Для учета ШП НКМ хорошо подходит многослойная модель. ШП разбивается на  $N$  – однородных слоев. Процедура составления такая же как для многослойной модели. В результате получается система интегральных уравнений для ШП, которая всю толщину образца НКМ представляется виде однородных слоев.

Полученные интегральные уравнения для измерительных датчиков с осевой симметрией, реализованных на волноводе круглого сечения, можно представить в виде разложения на линейные уравнения, зависящие от одной координаты.

Многослойная модель, описываемая МИУ удобна для описания, прогнозирования и моделирования температурных характеристик НКМ и ПКМ, что хорошо ложится на системы автоматизированного проектирования авиационных изделий из НКМ и ПКМ.

## Решение интегральных уравнений. Алгоритм решения ИУ

Решение интегральных уравнений производится численными методами. Наиболее распространенным для интегральных уравнений является проекционный численный метод (метод Галеркина) [1]. Решение находится в виде суммы:  $u \approx \sum_{n=1}^N a_n \xi_n$ , которая подставляется в интегральное уравнение. Функция  $\xi_n(y)$  является начальной функцией некоторой полной системы. Далее выбирается другая система функций  $\eta_i(x) - (i=1, 2, \dots, N)$ , на каждую из них домножаем интегральное уравнение и интегрируем в пределах  $(c, d)$ . В результате получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\sum_{n=1}^N a_n Q_{in} = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad \text{где} \quad Q_{in} = \int_c^d \int_c^d K(x, y) \eta_i(x) \xi_n(y) dx dy, \quad b_i = \int_c^d f(x) \eta_i(x) dx \quad (6)$$

Метод хорош если функции  $\xi_n(y)$  при небольшом  $N$  хорошо аппроксимируют решение, а интегралы (6) считаются аналитически. Функции  $\xi_n$  и  $\eta_i$  могут быть одинаковыми.

Решение интегралов производится численными методами по формуле прямоугольника или по формуле Симпсона. При решении интегральных уравнений шаг численной сетки берется равным  $\frac{1}{10} \lambda$ , в этом случае неопределенность ошибки вычисления составляет 4–5%. Количество базисных функций для разложения тока в методе Галеркина определяется количеством членов в ряде Фурье дающих устойчивое решение.

По приведенной теории был произведен контроль и определено значение относительной диэлектрической проницаемости образца НКМ, материала У-ПУ  $\epsilon=950 \pm 30\%$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta=1,3 \pm 40\%$ , имеющих модуль коэффициента отражения 0,94 [6].

Основная проблема контроля построение адекватной

метрологической схемы измерения и математическое описание процесса измерения для получения расчетных инженерных формул. Затруднения вызывает шероховатость поверхности (ШП) измеряемого материала. У проводящих полимеров она может 4-8 класса, что существенно вносит неопределенности в итоговый результат. Итоговым результатом будет являться комплексная диэлектрическая проницаемость  $\underline{\varepsilon}$  контролируемого материала.

Контроль  $\varepsilon$  на СВЧ производят косвенными методами, итоговая неопределенность косвенных методов контроля  $\underline{\varepsilon}$  ПКМ состоит из погрешностей параметров входящих в расчетные соотношения. Итоговую неопределенность результата  $\underline{\varepsilon}$  ПКМ условно можно разделить на следующие группы: инструментальные неопределенности; неопределенности образцовых мер; методические неопределенности; технологические неопределенности.

Реально измеряемые образцы ПКМ имеют высокую проводимость, соизмеримую с проводимостью образцовой меры. Поэтому в процессе контроля необходимо учитывать проводимость образцовой меры и его значение комплексного коэффициента отражения. Кроме того, за счет разности распределений и уровней ШП образцовой меры и измеряемого образца ПКМ возникает неопределенность образцовой меры, по отражательной характеристике. С целью уменьшения величины инструментальной неопределенности вводятся промежуточные образцовые меры, имеющие распределения и уровень ШП как измеряемые образцы ПКМ, для обеспечения более точного задания начальной точки отсчета. В группу неопределенностей образцовых мер входят: по точности изготовления рельефа ШП образцовых мер; неопределенности по точности передачи характеристик проводимости покрытия нанесенного на измеряемый образец при изготовлении шероховатой образцовой меры и нанесенного на эталон при изготовлении промежуточной гладкой

образцовой меры.

Инструментальную неопределенность можно уменьшить за счет методической неопределенности. Методическая неопределенность возникающая из-за не учета ШП измеряемого образца ПКМ. В качестве примера подтверждающего, что неопределенность, связанная с ШП измеряемого образца является существенной и ввод дополнительных промежуточных образцов мер необходим, приводятся результаты контроля образца ПКМ. Измерение производилось образцов ПКМ с ШП, уровень ШП 5-7 мкм, что соответствует дополнительному фазовому набегу порядка  $0,1^\circ$  в трех сантиметровом диапазоне длин волн. Уровень ШП образцовой меры относительно, которого производится контроль, составляет 1 мкм.

Оценку уровня ШП измеряемого образца необходимо производить в инструментальной части – ввод дополнительных промежуточных образцов мер и в методической части – ввод корректирующих добавок учитывающие ШП измеряемого образца ПКМ. Остальные виды неопределенностей присутствуют в традиционных методах и способах измерений их можно считать известными.

### **Анализ влияния ШП ПКМ на результаты контроля**

Для проведения контроля диэлектрических характеристик ПКМ в первую очередь будет интересоваться качество его технологической подготовки, т.е. шероховатость измеряемой поверхности. Методы измерения ШП изделий, регламентируемые ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 27964-88 [7] оказались не пригодными для контроля ШП изделий из ПКМ, т.к. измерение ШП производится в некоторых точках и на участках малых размеров. Значения классов шероховатости металлов отличаются от значений классов шероховатости органических диэлектриков. Например, ШП изделий из ПКМ превышает ШП аналогичных изделий из стали в 3–5 раз при неизменном режиме механической обработки. ШП ПКМ

определяется внутренней структурой материала. Кроме того, состояние поверхности изделий из ПКМ характеризуется следующими признаками: характерным цветом, пористостью, наличием трещин, текстурой армирующего наполнителя, раковинами, сколами, сажистыми образованиями, шероховатостью [9-11]. Часть этих признаков относится к характерным для данного композиционного материала особенностям структуры, другая – обусловлена режимами механической обработки изделия, остальные признаки относятся к технологии изготовления изделия из данного композита. ШП является исходным требованием к технологическому процессу образования поверхности, и прямо или косвенно связана с различными показателями ее качества. Контроль ШП изделий из ПКМ является наиболее сложным из-за особенностей структуры ПКМ. Так, например, структурные особенности поверхности углеродных композиционных материалов являются: поры, усадочные раковины, ворс волокнистых наполнителей, зерна кокса крупностью до 3 мм, и т.д. ШП, в виде неоднородностей, размерами от 0,5 мм до 3 мм. Например, в технической документации на изделие из углеродосодержащих ПКМ параметр ШП обычно задается числовой характеристикой  $R_z$ , определение которой производится на основе профилограммы. ШП ПКМ может колебаться от 1 мкм до 0,5 мм, так, что неопределенность измерения ШП будет определяться неопределенностью измеряемого прибора. Образцы ПКМ для измерения проходят проверку на соответствие плоскости, по ШП, по геометрическим размерам, по однородности, по отсутствию механических повреждений и т.д. Неопределенности изготовления образцов составляет  $\pm 0,005$  мм.

Перед проведением измерений измеряемый образец проходит подготовку и контроль его параметров. По его техническим данным (уровень ШП профиля) производится подбор или изготовление промежуточной образцовой меры, которая повторяет статистически

рельеф ШП измеряемого образца ПКМ и позволяет получить результаты с минимальной неопределенностью. Промежуточная образцовая мера должна как можно точнее передавать поверхностную структуру измеряемого образца, тем самым, устраняя технологические неопределенности изготовления шероховатой образцовой меры и не соответствие между измеряемым образцом.

В процессе подготовки образцов ПКМ для измерений у них остается не устранимая ШП, которая приводит к дополнительным инструментальным и методическим неопределенностям. Как отмечалось ранее, неопределенности вызванные ШП измеряемого образца ПКМ являются преобладающими. Неопределенность фазы отраженного сигнала, вызванная смещением плоскости отражения большая, по величине сравнимая с величиной инструментальной неопределенности измерения фазы. Так как в диэлькометрии считается, что плоскость отражения от диэлектрического материала совпадет с плоскостью прилегания к измерительному датчику, ШП традиционных материалов ( $\varepsilon < 100$ ) не учитывается. Реально при измерении ПКМ с ШП возникает вопрос о расположении плоскости отражения. В зависимости от характера неровностей их высоты на поверхности, геометрии плоскость отражения будет находиться выше или ниже медианной поверхности неровностей ПКМ. Численно это проверить позволяет модель ШП представленная в виде многослойной структуры. Поэтому необходимо произвести анализ для ее учета в процессе вычисления  $\varepsilon$ .

Известен способ представления ШП через промежуточный слой, в котором  $\varepsilon$  изменяется по градиенту вглубь материала. Такой способ сложен в процессе численной реализации. Более точное представление это шероховатый слой представляется как многослойная структура, в которой каждый слой имеет свое среднее значение  $\varepsilon$ . Данный способ представления ШП дает наилучшую точность, недостатком этого способа является



необходимость точного знания геометрии рельефа ШП, для определения усредненного значения  $\varepsilon$  в каждом слое.

Для совершенствования данной методики предложено представление ШП в виде многослойной структуры. За основу берется способ представления ШП в виде многослойной структуры который при усовершенствовании применим к контролю  $\varepsilon$  ПКМ и дает достоверный результат. Математически ШП ПКМ можно представить как среду со статистически неровными границами. Обобщенная модель ШП на плоскости представляется в виде многослойной структуры, считая каждый подслой структуры материала однородным и изотропным, коэффициент заполнения шероховатого слоя ПКМ подчиняется математическому закону. Такая структура позволяет произвести уточнение влияния ШП на коэффициент отражения для ПКМ с ШП.

С математической точки зрения ШП состоящая из подслоев толщиной  $d_i$  – можно считать с усредненным значением  $\varepsilon$  рассчитываемый по уравнению Лихтенекера [12] для сложных диэлектриков

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_0 V_1 + \varepsilon_1 V_2, \quad V_1 + V_2 = 1,$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость сводного пространства,  $\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость ПКМ,  $V_1$  – коэффициент заполнения подслоя сводным пространством от всего объема,  $V_2$  – коэффициент заполнения подслоя ПКМ от всего объема подслоя. В результате мы получаем промежуточный слой представляющий ШП между свободным пространством и ПКМ, состоящий из нескольких тонких подслоев, в которых  $\varepsilon$  изменяется по определенному математическому закону. Закон распределения  $\varepsilon$  по слою математически представляется в виде суммы

подслоев  $\sum_{i=1}^N \varepsilon_i V_{1i} + \varepsilon_2 V_{2i}$ , где  $V_{1i}$ ,  $V_{2i}$  – коэффициенты заполнения

$i$ -подслоя от всего объема. ШП ПКМ представляется в виде многослойной

структуры, в которой каждый из слоев имеет различное заполнение ПКМ. Представлена математическая модель сложной ШП, которая разбивается на несколько подслоев, представляя ее в виде плоскопараллельной структуры. Каждый подслою такой структуры характеризуется разным коэффициентом заполнения слоя диэлектриком, а его  $\varepsilon$  считается усредненной по слою, при этом подслою считается однородным и изотропным. Отражение плоской волны от такой структуры рассчитывается через матрицу передачи, описывающий каждый подслою. Количество слоев выбирается в зависимости от уровня ШП и распределение неровностей происходило равномерно по выбранному дискрету  $\Delta\varepsilon$ .

Каждый подслою описывается через характеристическую матрицу [8], которая является матрицей передачи. Характеристика каждого слоя представляется матрицей передачи подслою в зависимости от коэффициента заполнения ПКМ подслою. Так для подслою  $i$  матрицы передачи  $M_i$  равна

$$M_i = \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \left( k d_i \sqrt{\varepsilon_i} \right) & \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_i}} \operatorname{sh} \left( k d_i \sqrt{\varepsilon_i} \right) \\ \sqrt{\varepsilon_i} \operatorname{sh} \left( k d_i \sqrt{\varepsilon_i} \right) & \operatorname{ch} \left( k d_i \sqrt{\varepsilon_i} \right) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $k$  – волновое число,  $d_i$  – толщина  $i$ -подслою,  $\varepsilon_i$  – диэлектрическая проницаемость  $i$ - подслою. Обобщенная матрица всего шероховатого слоя представляется в виде произведения промежуточных матриц (7).

$$M = \prod_{i=1}^N M_i = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Из общей матрицы находится коэффициент отражения электромагнитной волны от ШП ПКМ по формуле (9) и коэффициент прохождения по формуле (10)

$$\underline{R} = \frac{M_{11} + M_{22} - M_{12} - M_{21}}{M_{11} + M_{22} + M_{12} + M_{21}}, \quad (9) \quad \underline{T} = \frac{2}{M_{11} + M_{22} + M_{12} + M_{21}}. \quad (10)$$

Поэтому для точного определения плоскости отражения от ШП необходимо ввести определение  $\varepsilon_{\Sigma}$  для представления фазовых характеристик ШП через многослойную структуру. Введение местоположения плоскости отражения от ШП позволяет составить более простую математическую модель описания формирования фронта отраженной волны отраженную от гладкой поверхности. Т.е. гладкая поверхность удаляется или приближается к источнику зондирующей волны на некоторую величину  $\Delta$ . Тогда шероховатый слой выражается как слой, имеющий некую усредненную величину  $\varepsilon$  по слою. ШП ПКМ изменяется от 1 мкм до 0,5 мм, геометрия зависит от технологии изготовления ПКМ (внутренней структуры) и способа механической обработки. По проделанному анализу образцов ПКМ выявлено, что: разброс значений  $\varepsilon$  колеблется от 100 до 1500; ШП изменяется в пределах от 5 до 500 мкм. На основе многослойной структуры ШП проведено математическое моделирование нахождения комплексного коэффициента отражения  $\underline{R}$  от различного уровня ШП. Законы распределения  $\varepsilon$  по ШП в зависимости от ее структуры могут иметь следующие законам распределения.

На основании предложенной многослойной модели ШП рассчитаны фазовые зависимости от различных законов распределения  $\varepsilon$  по шероховатому слою.

Полученные расчетные зависимости позволяют произвести корректировку измеренного значения комплексного коэффициента отражения. Процедура использования фазовой корректировки производится при проведении контроля измеряемого образца ПКМ с ШП с использованием традиционной образцовой меры. Следующим шагом производится измерение профиля ШП, путем измерения профилограммы образца ПКМ, и с помощью профилометра определяется уровень ШП. По

измеренным данным распределению и уровню ШП находят соответствующее значение фазового сдвига, по значению которого производится уточнение результата комплексного коэффициента отражения от образца ПКМ с ШП. В результате мы получаем величину комплексного коэффициента отражения от ПКМ с гладкой поверхностью. После чего производим вычисления  $\varepsilon$ . Полученный результат будет откорректирован и имеет уменьшенную методическую неопределенность.

#### Литература

1. Васильев, Е.Н. Возбуждение тел вращения./ Е.Н. Васильев – М.: Изд-во Радио и связь, 1988. – 271 с.
2. Кислюк, М.Ж. Метод вторичных волн в задачах электродинамики./ М.Ж. Кислюк. – Л.: 1970. – 151 с.
3. Малушков, Г.Д. Методы решения задач электромагнитного возбуждения тел вращения./ Г.Д. Малушков // Изв. ВУЗов. Сер. Радиофизика. – 1975. – Т.18. – №11. – С. 1563–1587.
4. Никольский, В.В. Проекционные методы в электродинамике. // Прикладная электродинамика./ В.В. Никольский – М.: Изд-во Высшая школа. – 1977. – вып.1. – С.4–50.
5. Хижняк, Н.А. Интегральные уравнения макроскопической электродинамики./ Н.А. Хижняк. – Киев: Изд-во Наук. думка, 1986. – 256 с.
6. Дмитриенко, Г.В., Анисимов, В.Г. Измерение диэлектрической проницаемости низкоимпедансных композиционных материалов на СВЧ / Г.В. Дмитриенко, В.Г. Анисимов //Измерительная техника – 2009. – № 2.
7. ГОСТ 27964-88. Измерение параметров шероховатости. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
8. Корнблит, С. СВЧ оптика. Оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ антенн./ С. Корнблит – М.: Изд-во Связь, 1980. –

360 с.

9. Кучин, А.А. Оптические приборы для измерения шероховатости поверхности. / А.А. Кучин, К.А. Обрадович. – Ленинград: Изд-во Машиностроение, 1981. – 198 с.

10. Барышников, И.В. Влияние шероховатой поверхности волноведущей системы на ВЧ-потери. / И.В. Барышников, В.А. Дацковский, А.В. Уполовнев // Радиотехника и электроника. – 1988. – Т.33. – №10. – С. 2029–2034.

11. Данилов, Ю.И. К проблеме микронеровностей токонесущих поверхностей в СВЧ диапазоне радиоволн./ Ю.И. Данилов, А.Д. Французов, Е.А. Воробьев // Труды ЛИАП. – 1968. – Вып.59. – С. 92–96.

12. Богородицкий, Н.П. Материалы в радиоэлектронике. / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков – М.: Изд-во Госэнергоиздат, 1975.

УДК 658.71.08,519.87

## **Управление риском процессов использования композиционных материалов в эксплуатации воздушных судов**

Ионов В.В.<sup>1</sup>, к.т.н.

Ionov Vladimir Vasilievich, Candidate of Engineering Science

[iovlad@mail.ru](mailto:iovlad@mail.ru)

<sup>1</sup>*Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева*

### ***Аннотация:***

*Актуальной задачей повышения надёжности эксплуатации летательных аппаратов является оценка рисков разрушения композитных материалов, используемых при изготовлении отдельных элементов конструкции планера и двигателей. Предлагается статистический подход к оценке рисков, основанный на анализе функций риска. В качестве функций риска используется построенная функциональная зависимость математического ожидания от значений случайной величины контролируемого параметра, распределённого по нормальному закону распределения. Математический анализ функции риска стандартного нормального распределения показал, что экстремумы функции симметричны относительно интегрального значения и отличаются на среднеквадратическое отклонение.*

### ***Ключевые слова:***

*функция риска, нормальный закон распределения, усталостная прочность.*

## **Введение**

Проектирование современной авиационной техники производится с учётом особых требований к безопасности полётов при жёстких условиях эксплуатации – пиковых повторяющихся нагрузках аэродинамического характера, форсированных режимах полётов в различных погодных и климатических условиях, резких перепадах температур [1]. Таким требованиям в настоящее время всё в большей степени удовлетворяют конструкции летательных аппаратов, использующие композитные материалы (КМ). Надёжность конструкций КМ принято оценивать по характеристикам надёжности материалов:

- Выносливость и сопротивление малоцикловой усталости
- Скорость роста трещины усталости
- Статическая и циклическая трещиностойкость
- Сопротивление коррозионному растрескиванию

Приведённые характеристики суммарно оценивают усталостную прочность конструкций из волокнистых композиционных материалов на основе статистических данных испытаний образцов изделий [2]. Для оценки риска разрушения конструкции важна интегральная вероятностная характеристика усталостной прочности изделия – контролируемый параметр, с помощью количественной оценки которого можно предсказать надёжность.

## **Статистический анализ рисков**

Очевидно, в силу воздействия многочисленных факторов функция плотности распределения контролируемого параметра будет близка к нормальному закону распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

где  $x$  – значение исследуемого параметра,  $m$  – математическое ожидание,  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение,  $f(x)$  – функция Гаусса.

Будем оценивать риск через математическое ожидание контролируемого параметра [3]. Определим структуру рисков для параметра с нормальным законом распределения. Для этого построим функцию риска – функцию зависимости математического ожидания от значений параметра. Для упрощения выкладок воспользуемся стандартным нормальным законом распределения, в котором математическое ожидание равно нулю, а среднеквадратическое отклонение равно единице.

$$R(x, \delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x-\delta}^{x+\delta} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

В функцию риска включён параметр интегрирования –  $\delta$ . После выполнения операции интегрирования получим выражение для функции риска:

$$R(x, \delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (e^{2x\delta} - 1) e^{-\frac{(x+\delta)^2}{2}}$$

Исследуем функцию на экстремумы, приравняв первую производную функции рисков к нулю:

$$R'(x, \delta) = e^{-\frac{(x+\delta)^2}{2}} (1 - e^{2x\delta})(x + \delta) + 2\delta e^{2x\delta} = 0$$

Приравняв выражение в квадратных скобках к нулю, получим трансцендентное уравнение для определения значений переменной  $x$ , при которых наблюдаются экстремумы функции:

$$x = \delta \frac{1 + e^{2x\delta}}{e^{2x\delta} - 1}$$

Чтобы решить это уравнение, разложим функцию экспоненты в степенной ряд, ограничившись двумя членами разложения:

$$e^{2x\delta} = 1 + 2x\delta$$

Тогда получим выражение для определения значений  $x$ , при которых наблюдаются экстремумы функции риска:

$$x = \frac{1}{x} + \delta$$



Выбирая значения параметра интегрирования  $\delta$  сколь угодно малым, получим  $x = \pm 1$

Возвращаясь к исходным параметрам нормального распределения, можно получить значения экстремумов:

$$x_1 = m + \sigma$$

$$x_2 = m - \sigma$$

Таким образом, значения экстремумов лежат в области трёх сигм, что говорит об адекватности решения задачи.

На Рис. 1 приведён график функции рисков для стандартной случайной величины, распределённой по нормальному закону распределения. Функция является нечётной, рассчитана для значения параметра  $\delta=0.001$ . Нулевое значение риска обусловлено тем, что значение переменной в начале координат равно нулю. Отрицательные значения риска объясняются отрицательными значениями переменной  $x$ . Экстремумы функции риска наблюдаются при значениях переменной

равной  $x_1 = 1$   
 $x_2 = -1$ .

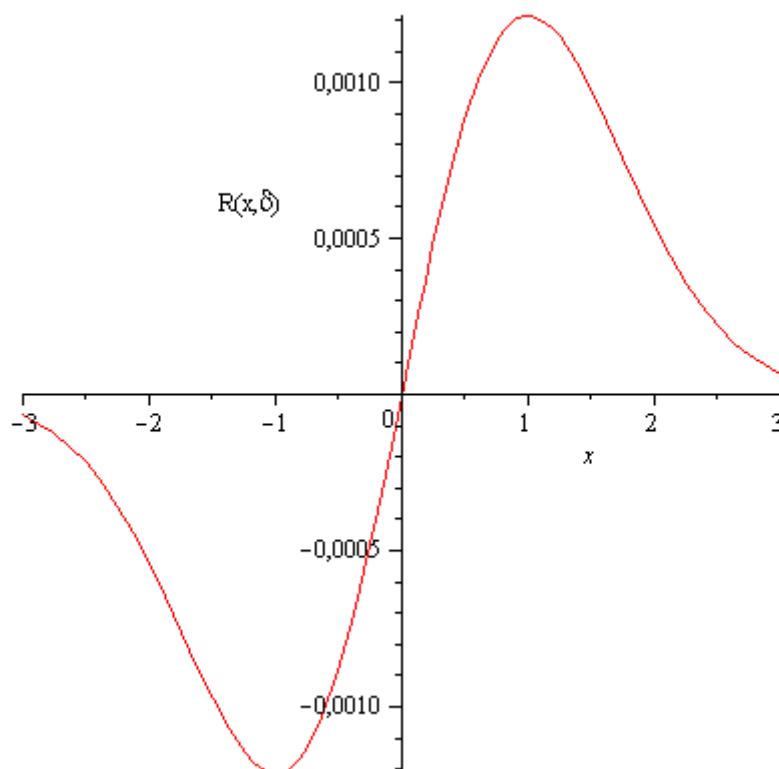


Рис. 1 – График функции рисков для стандартной случайной величины  $x$

Для практических применений функций риска необходимо получить закон распределения исследуемого контролируемого параметра, например, усталостной прочности композитного материала. Если функция плотности распределения близка к нормальному закону, то можно определить значения усталостной прочности, при которых будет максимальная прочность конструкции из композитного материала.

### **Заключение**

Рассмотрен статистический подход к оценке риска разрушения композитных материалов. Построена функция риска для стандартного нормального закона распределения контролируемого параметра. Определены экстремумы и построен график функции.

### **Литература**

1. Буров, А.Е. Моделирование разрушения и трещиностойкость волокнистых металлокомпозитов / А.Е. Буров, И.И. Кокшаров, В.В. Москвичев. Новосибирск: Наука, 2003.
2. Макин, Ю.Н. Основы производства ЛА и АД. Конструкции из композитных материалов/ Ю.Н. Макин.: учебно-методическое электронное издание. - Факультет механический. - Кафедра ремонта ЛА и АД (РЛА и АД), <http://storage.mstuca.ru/handle/123456789/4436>
3. Ионов, В.В. Оценка страховых рисков авиакомпании./ В.В. Ионов, Кургачёв В.Н. , Лебедев А.М.// Научный вестник УВАУ ГА (И) - №7, 2015 – С. 17–20.

УДК 621.002.3+629.7

## **Компетенции государственных научных центров России в создании композитных крыльев самолетов**

Комиссар О.Н.<sup>1</sup>, к.т.н.

[oleg.komissar@technologiya.ru](mailto:oleg.komissar@technologiya.ru)

<sup>1</sup>*Акционерное общество «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина», Государственный научный центр Российской Федерации (АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»)*

### ***Аннотация:***

*В статье приводится ретроспективный анализ за последние 30 лет опыта создания углепластиковых конструкций для крыльев пассажирской и боевой авиации специалистами государственных научных центров Российской Федерации ФГУП «ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского», ФГУП «ВИАМ», АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».*

### ***Ключевые слова:***

*Панель крыла, лонжерон крыла, полимерный композиционный материал, углепластик, интегральная конструкция, автоклавное формование, препрег, автоматизированная выкладка слоев.*

Эффективное применение полимерных композиционных материалов в крыле самолета зависит не только от качественного его проектирования с учетом особенностей композитов, в частности, поведения внутренних дефектов и наличия опыта долговременной эксплуатации в составе

воздушного судна. Но наибольшие сложности связаны с тем, что армированный композиционный материал приобретает свои свойства непосредственно в процессе производства детали, причем эти свойства различны для разных технологий формования. Еще одним существенным камнем преткновения на пути создания панелей и лонжеронов крыльев самолетов являются их значительные размеры, что, с одной стороны, усугубляет процессы коробления деталей и увеличивает уровень остаточных напряжений, влияющих на рост внутренних дефектов и снижающих ресурсные характеристики конструкции в целом. Мировой опыт первого применения углепластиков в крыльях самолетов в 80-х годах прошлого века убедительно показывает, что в отличие от традиционных металлов создание композитных высоко ответственных и нагруженных агрегатов может быть эффективным только в том случае, когда обеспечена совместная работа материаловедов, прочнистов, конструкторов и технологов.

В авиационной отрасли России есть центры компетенции в области композитов, которые уже многие десятилетия успешно создают крылья из полимерных композиционных материалов для отечественной авиационной техники, не раз доказали и сегодня продолжают на практике доказывать высокую эффективность совместной работы. Это – государственные научные центры Российской Федерации «ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского», «ВИАМ» и «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина». Сегодня эти центры оснащены современным специализированным оборудованием в области прочности, материаловедения, неразрушающего контроля качества и ремонта, технологий изготовления композитных конструкций.



Рис. 1 – Установка высокоскоростной автоматизированной выкладки слоев препрега для изготовления панелей и лонжеронов

Тесное взаимодействие «ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского», «ВИАМ» и «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» впервые было отработано и практически реализовано при создании крупногабаритных углепластиковых створок отсека полезного груза и воздухопроводов системы термостатирования многоразового космического корабля "Буран", которые успешно прошли опробование во время первого полета 15 ноября 1988 года.

В нынешнем году исполнится уже 30 лет со дня этого уникального полета в автоматическом режиме, до сих пор не имеющего аналогов в мировой практике.

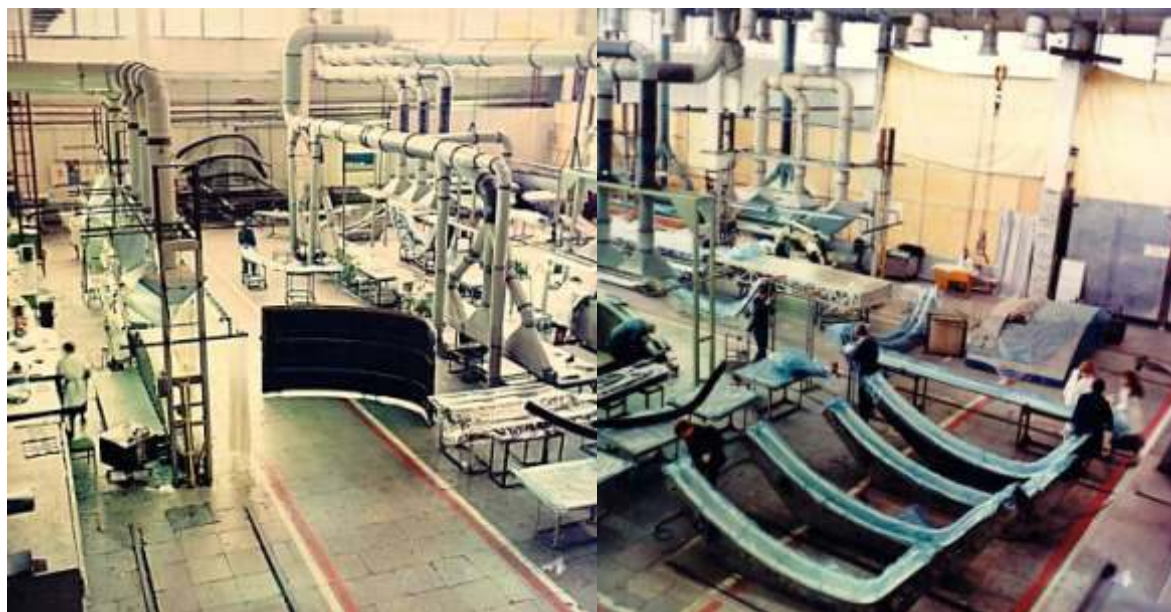


Рис. 2 – Цех серийного производства углепластиковых конструкций для ВКС «Буран»

Созданный по этой программе глубокий научно-технический задел в последующие десятилетия дал основу для создания широкой номенклатуры уникальных конструкций для авиационной и ракетно-космической техники.

В середине 1980-х годов впервые была выполнена широкомасштабная работа по созданию и сертификации спортивно-пилотажного самолета Су-26М с высоким объемом применения композиционных материалов в крыле, фюзеляже и хвостовом оперении. «ВИАМ» создал гибридные полимерные композиты на основе клеевого связующего, «ЦАГИ» совместно с «ОКБ Сухого» впервые научно обосновали и назначили нормы прочности для данных агрегатов. ОНПП «Технология» впервые создало технологию совмещенного формования трехслойных панелей крыла и неразрезного углепластикового лонжерона крыла интегрального типа. В последующие годы на созданной научно-производственной базе «Гражданские самолеты Сухого» разработали и поставили на серийное производство следующее поколение спортивных и учебно-тренировочных самолетов Су-29М, Су-31М и Су-49УТС.



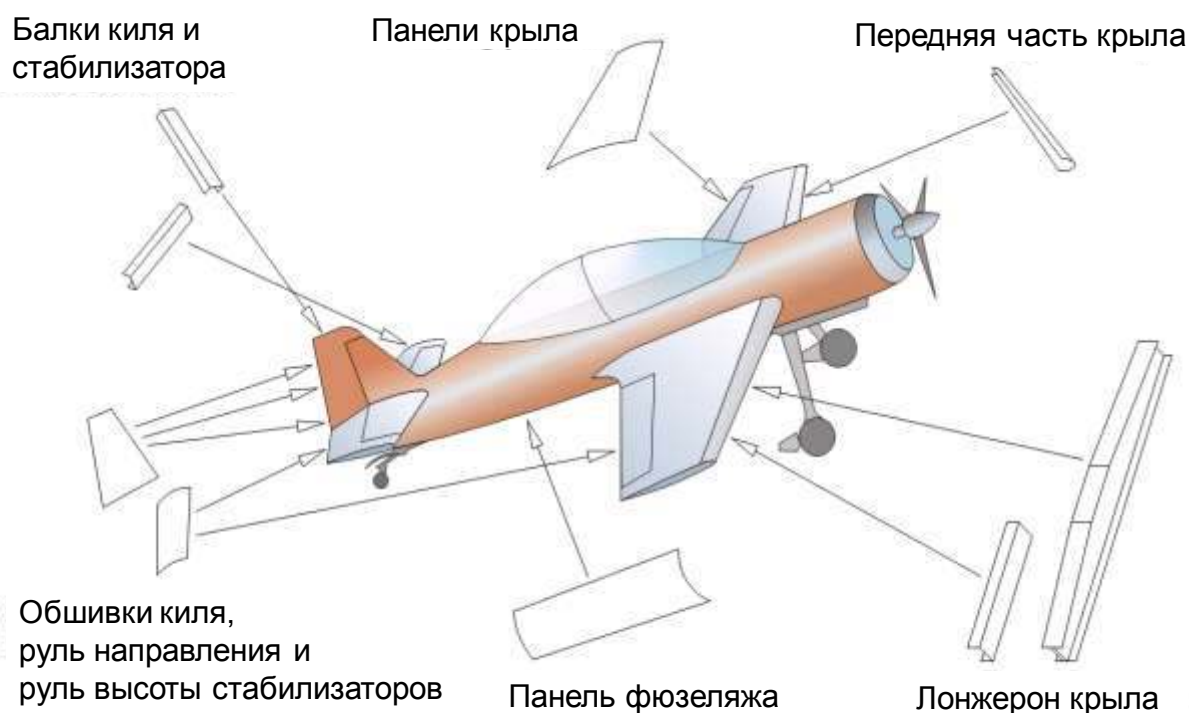


Рис. 3 – Состав комплекта поставки композитных конструкций для спортивно-пилотажных и учебных самолетов Су-26, Су-29, Су-31, Су-49

В конце 1980-х годов первым опытом создания деталей крыла из отечественного углепластика разработки «ВИАМ» на основе углеродных волокон УКН-5000 стали панели отъемной и средней части складывающегося крыла палубного истребителя Су-33. На них были впервые реализованы цельноформованные вырезы для люков топливного бака, интегральные стрингерные панели с локальными усилениями в местах подвески пилонов. На этом изделии решены задачи обеспечения бездефектности и высокой прочности зоны интегрального соединения стрингеров с обшивками без механических крепежных элементов.

В дальнейшем этот опыт был распространен на крупногабаритные и толстостенные углепластиковые панели крыла изменяемой стреловидности стратегического бомбардировщика экспериментального изделия 54С «ОКБ Сухого». Параллельно велись работы по созданию углепластиковых панелей крыла обратной стреловидности изделий С-22 и С-32, которые успешно завершились 25 сентября 1997 г. первым полетом

высокоманевренного самолета Су-47 «Беркут» с крылом обратной стреловидности. Впервые в отечественной практике «ВИАМ» разработал калиброванный препрег углепластика КМУ-7 для применения в установке автоматизированной выкладки. Впервые панели крыла были изготовлены машинным методом без использования ручной выкладки слоев. При этом обеспечено качественное автоклавное формование крупногабаритных панелей толщиной более 20 мм.

Успешно завершена разработка и началось серийное производство углепластиковых конструкций для крыла, хвостового оперения и фюзеляжа истребителя пятого поколения Су-57. Новым этапом для специалистов Государственного научного центра Российской Федерации ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина стала разработка впервые в отечественной практике технология изготовления крупногабаритных стрингерных панелей интегрального типа для киля и стабилизатора самолета МС-21.



Рис. 4 – Стрингерная панель киля самолета МС-21



Впервые подобная технология была промышленно применена ОНПП «Технология» для цилиндрических переходных отсеков из углепластика ракеты-носителя «Протон-М», которые начали эксплуатироваться в составе модернизированного ракеты-носителя с 2004 года.

В настоящее время на ООПП «Технология» им. А.Г. Ромашина проведена отработка конструкций неразрезного крыла и ведется сертификация легкого самолета Т-500 для выполнения агрохимических работ в сельском хозяйстве.

Таким образом, за последние 30 лет государственными научными центрами авиационной отрасли в тесном сотрудничестве созданы и доведены до производства уникальные композитные конструкции аэродинамических несущих агрегатов для десяти типов отечественных самолетов.

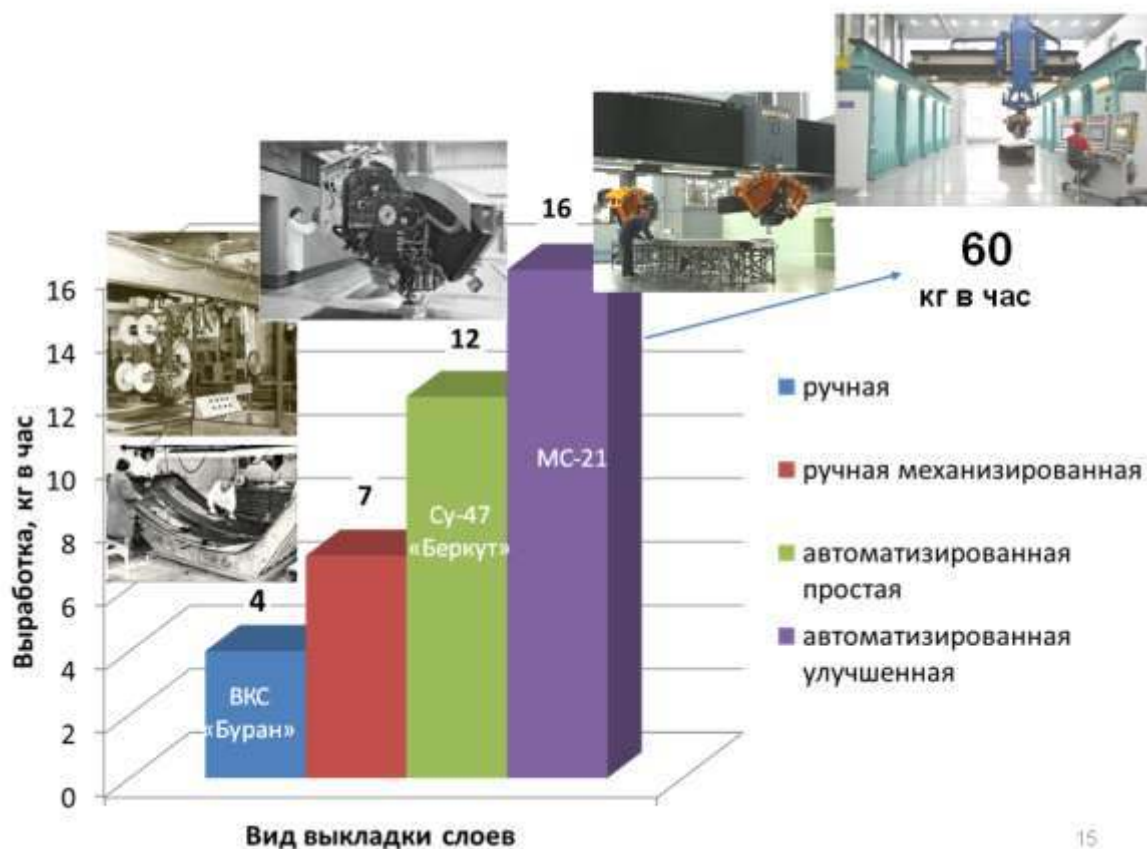


Рис. 5 – Эволюция производительности труда при выкладке слоев композиционных материалов

Этот богатый практический опыт и дополнительно развитые за последние десять лет компетенции являются мощной базой для создания отечественной высоко конкурентной на международном рынке авиационной техники с высокой долей полимерных композиционных материалов отечественного производства.

#### Литература

1. Комиссар О.Н., Хмельницкий А.К., Выморков Н.В., Литицкая В.А. Конструктивно-технологические аспекты управления прочностью толстостенных панелей // Конструкция и технология получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов XIV научно-технической конференции, 17-18 окт. 1995, Обнинск. - Обнинск: Конверсия, 1995. - С. 107.

2. Щербаков В.Т., Свиридов А.Г., Выморков Н.В., Комиссар О.Н. Опыт создания высоко- и средненагруженных конструкций из полимерных композиционных материалов для изделий авиакосмического назначения. // Том 5. Материалы и технология производства авиакосмических систем. Труды первой международной авиакосмической конференции. Москва, 28 сент. - 2 окт. 1992 г. - М.: Российская инж. академия, 1995. - С. 409–422.

3. Климакова Л.А., Комиссар О.Н. Методология создания интегральных конструкций из композиционных материалов для перспективной авиационно-космической техники // Авиационная промышленность. - № 4,2000. – С. 19–22.

4. Климакова Л.А., Комиссар О.Н. Опыт создания интегральных конструкций из ПКМ для авиационной техники // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов – 21 век: Сборник докладов международной конференции SAMPE Europe, 30 января – 2 февраля 2001, Москва, МГУ. – М: РИА, 2001. – С. 64–72.

5. Комиссар О.Н., Зиновьев П.А., Смердов А.А., Буш А.В. Обеспечение стабильности размеров и формы трубчатых элементов и оболочек из полимерных композитов для космических аппаратов // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов: Сборник докладов 3-й международной конференции SAMPE Europe, 27–30 августа 2003, Москва, МГУ. – М: Знание, 2004. – С. 456–466.

6. Викулин В.В., Комиссар О.Н. Научно-технические промышленные технологии // Аэрокосмический курьер. - № 1(49), 2007. – С. 44–45.

7. Комиссар О.Н., Хмельницкий А.К. Российский центр компетенции по разработке и производству аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов // Композиты и наноструктуры. - № 3, 2012. – С. 19–25.

8. Комиссар О.Н., Мухин Н.В., Выморков Н.В., Свиридов А.Г. Технологические аспекты производства углепластиковых деталей хвостового оперения МС-21-300 // Конструкция и технология получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов XXI научно-технической конференции, 5–7 октября 2016, Обнинск, АО "ОНПП "Технология". – Обнинск: ОНПП "Технология", 2017. – С. 41–45.

УДК 621.921.2

## **Применение направленной укладки волокна для получения высоконагруженных конструкций**

Халиулин В.И.<sup>1</sup>, д.т.н.; Константинов Д.Ю.<sup>1</sup>; Батраков В.В.<sup>1</sup>, к.т.н.

[pla.kai@mail.ru](mailto:pla.kai@mail.ru)

<sup>1</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ (КНИТУ-КАИ)*

### ***Аннотация:***

*Проводится оценка несущей способности композитных высоконагруженных конструкций, изготовленных различными методами подготовки преформ. Исследованы механические характеристики конструктивно-подобных образцов как расчетным, так и экспериментальным путем. Определена технологическая схема для создания однооснонагруженных конструкций из композитов.*

### ***Ключевые слова:***

*высоконагруженные интегральные конструкции, направленная укладка волокна, преформа, композиционный материал.*

Настоящие исследования инициированы снижением массы корпуса втулки РВ путем замены металлических элементов на композитные. В мировой практике известны конструкции несущих систем, состоящие из композиционных материалов, но, как правило, все они построены по торсионной схеме [1], которая является наиболее простой и технологичной. В настоящей работе рассматривается корпус втулки РВ

шарнирного типа, который представляет собой изделие вильчатой формы с интегрированной центральной частью (рис. 1). Замена существующей шарнирной схемы на торсионную повлечет за собой перепроектирование и испытание всей трансмиссионной системы. В связи с этим исследуется возможность изготовления существующего корпуса втулки РВ из углепластика в интегральном исполнении [2] без существенного изменения ее конструкции.



Рис. 1 – Корпус втулки рулевого винта в металлическом варианте

Композиционный материал в полной мере реализует свои свойства в конструкции когда потоки внутренних сил в изделии совпадают с направлением укладки армирующих волокон [3]. Технически реализовать данное условие для деталей, имеющих в своей конструкции отверстия, зачастую весьма сложно, так как большинство методов армирования рассчитано на создание регулярной структуры армирования.

Одним из процессов создания армирующей структуры с оптимизированной схемой укладки волокна относится метод Tailored Fiber Placement (TFP) – выкладка волокна по заданной траектории. Фиксирование армирующего волокна к вспомогательному несущему слою осуществляется при помощи верхней и нижней сшивных нитей, которые соединяются друг с другом, образуя петли [4].

Известна работа, где технологические возможности метода TFP дают положительные результаты при испытаниях на растяжение образцов с отверстием [5]. Образцы, изготовленные методом TFP, в которых реализовано локальное подкрепление отверстия или огибание

концентратора, показали результаты, близкие к результатам эталонных образцов без отверстий. В то же время в работе по исследованию несущей способности образцов типа «серьга», изготовленных с различной схемой армирования [6], метод TFR не дал положительного результата в приросте критической нагрузки разрушения при растяжении. Несущая способность образцов с кольцевым армированием превысила прочность квазиармированного образца всего на 9%.

С точки зрения механики работы материала в зоне отверстия такой результат плохо объясним. Было сделано предположение, что при укладке волокна, огибающие отверстие, образуют плоские ленты. Сечение лент находится в плоскости растяжения с образованием свободного пространства между волокнами при огибании отверстия (рис. 2). В результате при нагружении в работу включаются не все волокна одновременно. Сначала в работу включаются только волокна, близко расположенные к отверстию, а после их деформации – остальные. Очевидно, увеличивая высоту укладываемых волокон (переход от лент к жгутам) [7] можно приблизиться к схеме, обеспечивающей более полное армирование материала (рис. 2).

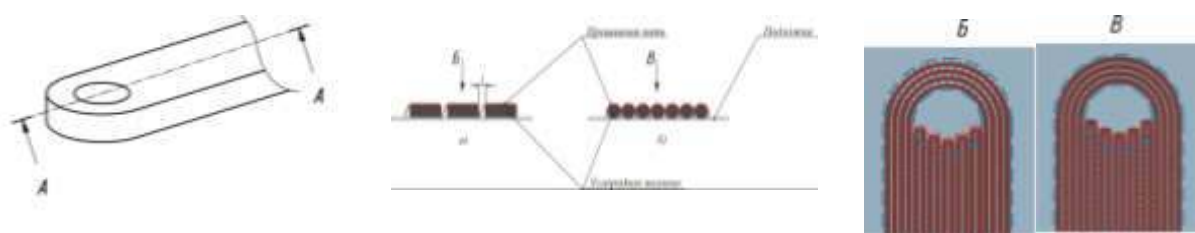


Рис. 2 – Схема реализации укладки волокна

Рассмотренные в представленных работах эксперименты по изучению схем армирования для композитных деталей с отверстиями не дают однозначного ответа о преимуществе той или иной технологической схемы.

Для подтверждения правильности выбора технологической схемы изготовления поставлен эксперимент по определению критической нагрузки разрушения образцов с отверстием при различных схемах армирования. Основным видом испытания выбрано растяжение образца, так как данный тип испытания будет максимально соответствовать основной нагрузке в виде центробежной силы. В качестве образца выбран конструктивно подобный элемент (КПО) типа «Проушина», которая, в свою очередь была упрощена до образцов типа «Серьги» (рис. 3).

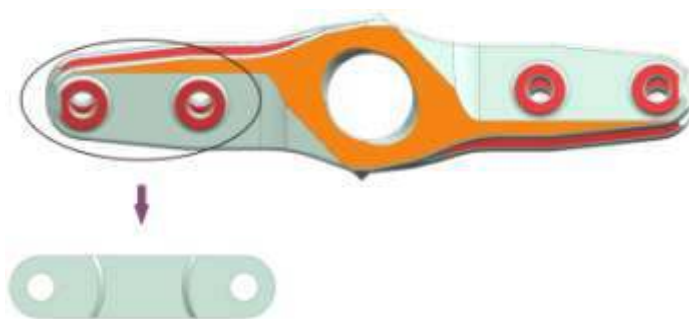


Рис. 3 – Конструктивно-подобные элементы «Серьга»

Были рассмотрены три типа образцов: образцы (2 вида.), изготовленные методом направленной укладки волокна со схемой укладки  $0^\circ$  в виде ленты и жгута с огибанием отверстия; образец, изготовленный из слоистого композита со схемой укладки  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ . Геометрические параметры каждого типа образца выбраны с учетом соблюдения равенства масс 27 г, а также учетом коэффициента наполнения волокном  $V_f$  56%. В качестве материала для композитных образцов использовались углеродная ткань саржевого переплетения Hexcel G0986 (AS4) и углеродное волокно Тогауса T700.

Был проведен конечно-элементный расчет рассматриваемых упрощенных образцов. Оценка прочности проводилась по критерию максимальных напряжений (нормальные и сдвиговые) и квадратичного



критерия Цзя-Ву (Tsai-Wu). Влияние геометрии укладки волокна в расчетах не учитывалось.

Результаты расчета прочности образцов показаны в таблице 1, а распределение обратного коэффициента запаса прочности — на рис. 5.

Таблица 1

Расчетные нагрузки разрушения образцов

№	Образец и материал	Критическая нагрузка, $F_{крит}$ кгс
1,2	TFP - 0° с огибанием отверстия	4885
3	Ткань – 0°, 90°, ±45°	2335

После изготовления образцы испытывались на определение критической нагрузки при растяжении. Результаты показаны на построенных диаграммах; характер разрушения продемонстрирован на рис. 4.

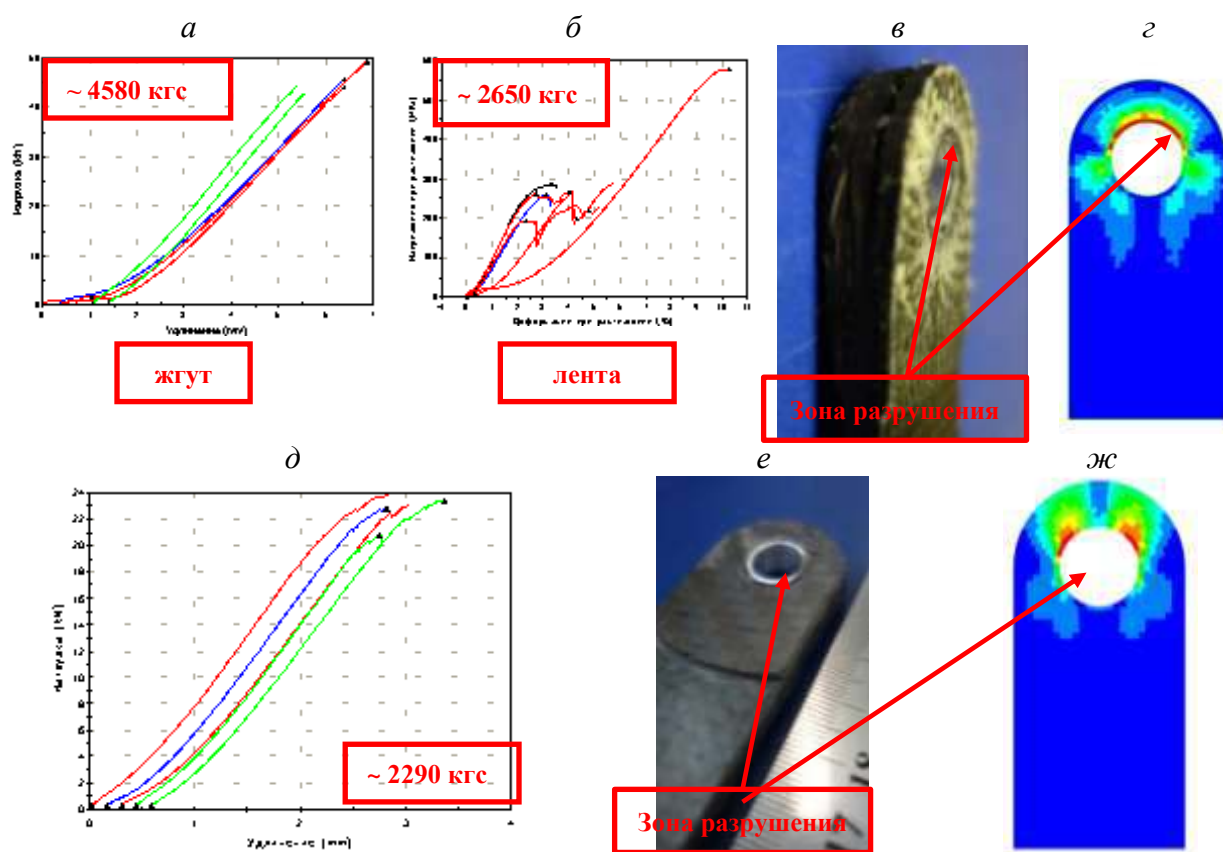


Рис. 4 – Диаграмма нагружения и характер разрушения образцов типа «серьга» при растяжении.



Как видно из результатов эксперимента, образцы укладкой волокна в виде жгута (рис. 4 а, в, г), имеют наибольшие значения по реализации несущей способности, данные образцы превзошли подобные образцы, изготовленные из ленты, на 40% (рис. 4 д, е, ж; рис. 5). Первая серия экспериментов показала хорошую сходимость расчетных данных с результатами эксперимента.



Рис. 5 – Сравнительная гистограмма

Таким образом, основной технологической схемой для дальнейших исследований выбрана технология направленной укладки волокна (TFP).

Вторая серия экспериментальных исследований заключалась в исследовании КПО типа «Проушина». Согласно выбранному типу статических испытаний разработана первоначальная структура расположения волокон КПО типа «Проушина». Траектория линий укладки углеровинга выбиралась таким образом, чтобы максимально обеспечить равномерную плотность преформы на всех ее участках (рис. 6).

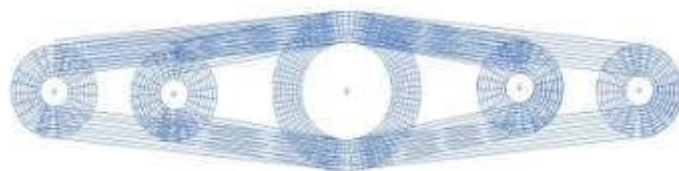


Рис. 6 – Траектория укладки волокна

Для определения количества слоев и корректировки схемы укладки проведены расчеты НДС и прочности конструкции. Расчеты проводились согласно критериям, рассмотренным в первой серии экспериментов. Результаты распределения обратного коэффициента критерия прочности по слоям образцов представлены на рис. 7, а схемы армирования – на рис. 8. Расчетная критическая нагрузка разрушения равна  $F_{крит} = 18690$  кгс.

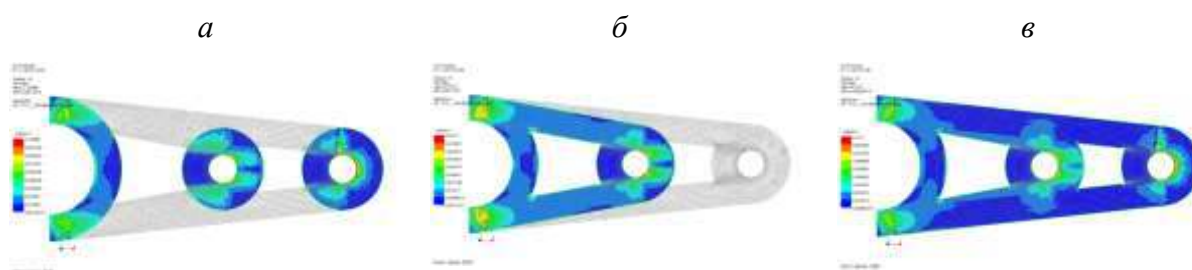


Рис. 7 – Результаты распределения обратного коэффициента критерия прочности по слоям

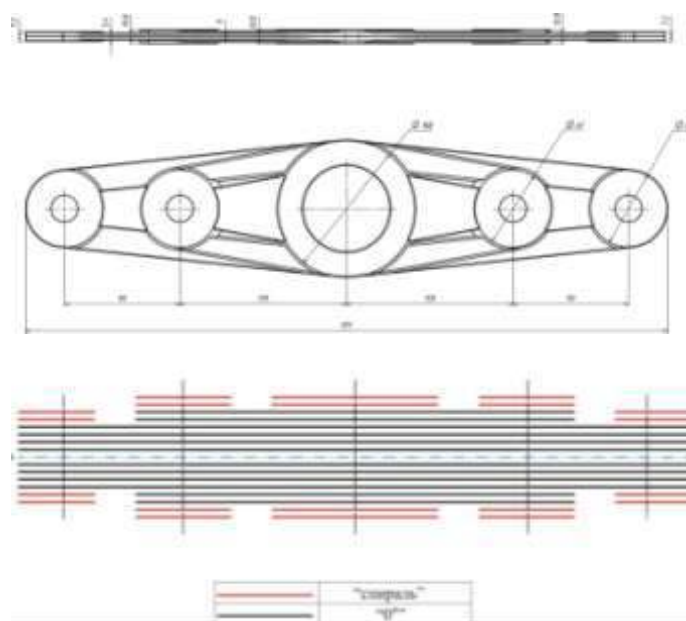


Рис. 8 – Геометрия и схема армирования КПО типа «Проушина»

После проведенных расчетов была изготовлена партия КПО типа «Проушина» для проведения статических испытаний по определению критической нагрузки разрушения. Результаты испытания представлены на рис. 9.

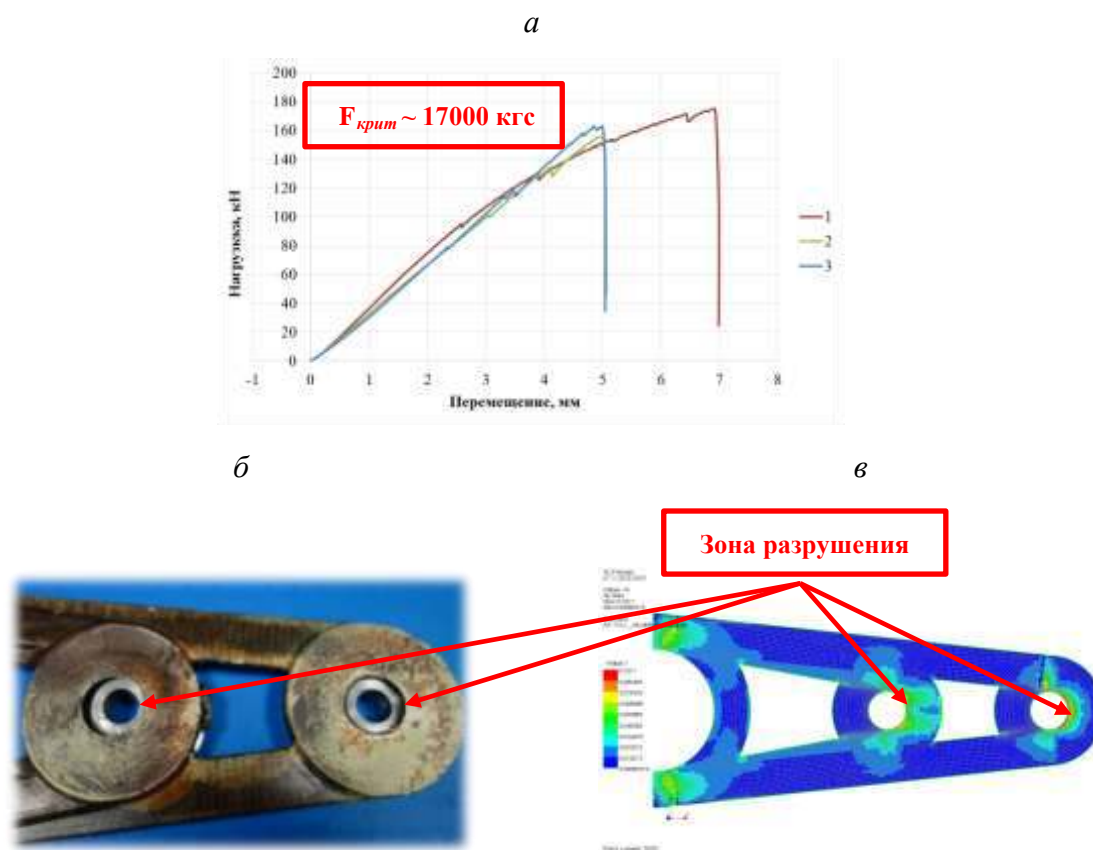


Рис. 9 – Результаты испытаний

Из эксперимента (рис. 9 б) видно, что разрушение КПО типа «Проушина» происходит вследствие разрыва слоев и значительного межслоевого разрушения материала вокруг втулки в ушке образца. Испытания образцов показали хорошую сходимость с расчетными данными, как по характеру разрушения, так и по значению разрушающих усилий, разница составляет менее 10% от полученных результатов.

Таким образом, вторая серия экспериментов подтвердила правильность выбора метода направленной укладки волокна для создания преформы корпуса втулки РВ. Подготовка преформ методом TFR с укладкой волокна в виде жгута позволит создать конструкцию с высокой

удельной прочностью, превышающей аналоги, с квазиизотропной укладкой. Сочетание методов TFP и RTM обеспечит высокую повторяемость как по геометрии, так и по механическим показателям.

#### Литература

1. Лебедев И.М. Расчет торсиона несущего винта в системе MSC.Nastran. – Авиастроение. Экспресс-информация. М.ВИНИТИ, 1985. 50 с.

2. Халиулин В.И., Батраков В.В. Анализ применения инновационных методов для производства интегральных конструкций из композитов. Изв. Вузov. Авиационная техника.2016.№3. С. 129-133.

3. Nijhof, A. H. J. 1983. Ontwerpen in vezelversterkte Kunststoffen, TH Delft (in Dutch).

4. Paul Mattheij, Kongard Glische and Dirk Feltin, Tailored Fiber Placement-Mechanical Properties and Applications, Journal of Reinforced Plastics and Composites 1998 17: 774.

5. Gliesche K., Hubner T., Orawetz H. Application of the Tailored Fiber placement (TFP) Process for a Local Reinforcement on an «Open-hole» Tension Plate from Carbon/Epoxy Laminates. Composite Science and Technology, Volume 63, Number 1, January 2003, pp 81-88.

6. Mills A., Patel Z., Dell Anno G, Frost M. Resin Transfer Molding of Highly Loaded Carbon Fiber Composite Aircraft Spars Using Novel Fabrics and Tow Placement Techniques. SAMPE Journal, May| June, 2007, Volume 43, Number 3, pp 67-7.

7. A. Spickenheuera,b\* , A. Leippranda , L. Bittricha,b, K. Uhliga , E. Richtera , G. Heinricha,c PROCESS-DEPENDENT MATERIAL PROPERTIES FOR STRUCTURAL SIMULATION OF COMPOSITES MADE BY TAILORED FIBRE PLACEMENT. EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, Seville, Spain, 22-26 June 2014.

УДК 678.8

## Опыт применения ПКМ в отраслях машиностроения

Постнов В.И.<sup>1</sup>, д.т.н.

[untcviam@viam.ru](mailto:untcviam@viam.ru)

<sup>1</sup>*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ») (УНТЦ ВИАМ)*

### **Аннотация:**

*Рассмотрено применение широкого спектра полимерных композиционных материалов (стекло и углепластиков) на разных видах полимерных связующих (полиэфирные, эпоксидные), используемых при изготовлении разнообразных изделий железнодорожного и автомобильного транспорта. Показала эффективность применения ПКМ по сравнению с традиционными металлическими сплавами, как по эксплуатационным, так и весовым характеристикам.*

### **Ключевые слова:**

*ПКМ, РЖД, автомобили, панели из стеклопластика, интерьерные панели, огнестойкие перегородки, полиэфирные смолы, эпоксидные смолы, углепластики.*

В современном авиастроении наблюдаются тенденции к увеличению объемов использования конструкций из композиционных материалов (МПКМ, ПКМ, ГПКМ и др.) [1, 2, 3].

Большое количество применяемых полимерных композиционных материалов (ПКМ) при создании уникального военно-транспортного самолёта Ан-124 и его модификаций на крупнейшем в России

авиационном промышленном комплексе (УАПК) ускорило процессы освоения и внедрения в серийное производство новых разработок ВИАМ в области материаловедения и прогрессивных технологических процессов. Для решения этой задачи приказом №15 от 5.03.1983 г. Министерства авиационной промышленности на УАПК создана базовая научно-исследовательская лаборатория ВИАМ. При этом развитие научных направлений в базовой лаборатории ВИАМ было неразрывно связано с требованиями серийного производства УАПК (в дальнейшем ОАО «Авиастар») при изготовлении самолётов Ан-124, Ту-204 и его модификаций [4].

Приобретённый большой опыт по разработке новых серийных технологий и использованию современных ПКМ позволило коллективу УНТЦ ВИАМ с успехом использовать свои знания в различных изделиях авиационной техники (рис. 1).



Рис. 1 – Применение разработанных технологий в опытном производстве



В рамках поисковых и договорных работ в ВИАМ (УНТЦ) разработаны и изготовлены:

- установка по производству профильных конструкций из ПКМ методом пултрузии;
- технология и промышленный проект производства модифицированной древесины, позволяющие придавать неделовой древесине (берёза, осина, тополь и т.д.) цветовую гамму цветных пород (орех, красное дерево, морёный дуб и т.д.);
- технология, конструкция и промышленный выпуск броневых автомобилей на базе УАЗ-512 для инкассаторских перевозок;
- конструкция и технология комбинированных бронежилетов «Снежок М», позволяющие по желанию потребителя менять уровень защиты.

С 2000 г. УНТЦ совместно с Ульяновскими предприятиями ОАО «Агрегат», ЗАО «ОКБ Агрегат» участвовал в программе РЖД по разработке технологий и конструктивных элементов из ПКМ для пассажирских вагонов с целью повышения эксплуатационных свойств (технологичность в ремонте, пожаробезопасность и др.), а также снижение их веса. Были разработаны технологии формования монолитных стеклопластиковых декоративных панелей элементов интерьера вагона, а также трехслойных стеклопластиковых панелей элементов перегородок и оснований лежаков в купе (рис. 2).



Рис. 2 – Стеклопластиковые панели интерьера железнодорожных вагонов

Стеклопластиковые панели различной формы представляют из себя сочетание различных материалов и конструктивных элементов:

- первый слой декоративный Гелькаут GF1800S;
- второй слой стекломат М705-450 фирмы "Neste", пропитанный смолой F805TF фирмы "Neste".

Данные панели могут быть использованы как декоративные облицовки стен, перегородок и других элементов интерьера вагона.

Трехслойные стеклопластиковые панели состоят из бумажных сот различной толщины, облицованные с двух сторон стеклопластиковыми панелями. Соты могут быть облицованы металлическими листами, а так же листами из других материалов.

Высокая прочность и низкий удельный вес позволяют широко использовать их в конструкциях вагона, в качестве перегородок, полов, потолков и других силовых и декоративных элементов [5, 6].

Разработаны технологии изготовления дверей различного назначения (в купе, туалете) из композиционных материалов, изготовлены выклеечные



оснастки и изготовлено несколько опытно-промышленных партий данных дверей для сертификационных и натурных испытаний, а также для серийного использования в пассажирском поезде «Александр Невский» (рис. 2, 3).



Рис.3 – Интерьер коридора купейного вагона

Основу полотна двери составляет трехслойная панель, состоящая из сотового наполнителя, облицованного с двух сторон пластиковым покрытием. Полотно двери окантовано буком. С внутренней стороны двери установлены зеркало, ручка защёлки двери, поворотный фиксатор открытия/закрытия замка, вентиляционная решётка. С внешней стороны двери имеется ручка защёлки двери, выход под ключ для открытия/закрытия двери, вентиляционная решётка. Изготовлено было более 200 дверей для пассажирского поезда «Александр Невский».

Большой интерес представляет разработка и реализация в опытном производстве проекта по межвагонному переходу (МВП) для пассажирских вагонов с использованием внутренних обшивок из стеклопластика (рис. 2). Проведённые испытания МВП показали их

высокую эффективность по эксплуатационной надёжности, безопасности пассажиров в переходах, а также высокое качество и дизайн внутреннего объёма этих переходов, о чем свидетельствуют отзывы предприятий РЖД.

Для возможного применения в пассажирских вагонах противопожарных перегородок УНТЦ ВИАМ совместно с НИИ железнодорожного транспорта (г. Тверь) были проведены огневые испытания опытных панелей из авиационных материалов (стеклопластики и трехслойные панели на фенолформальдегидных связующих, металлополимерные КМ типа Алор и СИАЛ, стеклопластики на полиэфирных и винилэфирных связующих). Результаты испытаний подтвердили высокие противопожарные свойства панелей из стеклопластика на фенолформальдегидных связующих и МПКМ (СИАЛ, Алор) по горючести и дымовыделению (рис. 4).

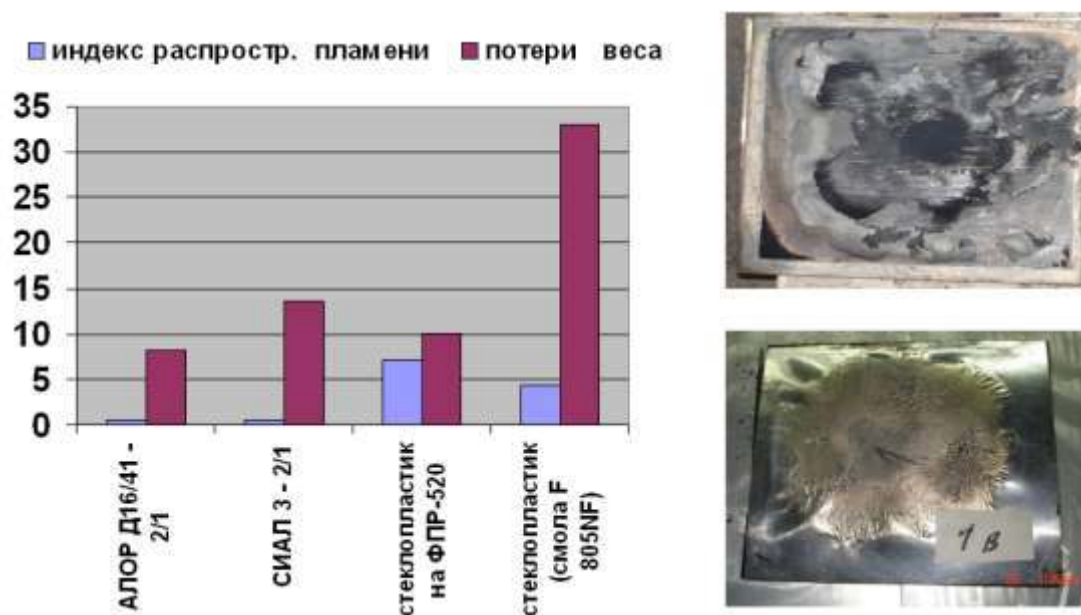


Рис. 4 – Материалы для огнестойких преград в вагонеостроении

Наряду с большим применением ПКМ в изделиях РЖД наработки в этой области были использованы в автомобильной отрасли в виде конструктивных элементов различного назначения (рис. 5). Для их

изготовления было использовано большое количество разработанных технологий:

- прессование (рессора автомобиля из стеклопластика);
- вакуумное формование (диск для спец автомобиля из стеклопластика на связующем ЭДТ-69н) [7];
- инфузионный процесс при изготовлении крыши УАЗ 31512 из стеклопластика на полиэфирном связующем [7, 8, 9];
- контактное формование (облицовка для автомобиля из стеклопластика на полиэфирном связующем);
- вакуумное формование элементов автомобиля из углепластика на полиэфирном связующем [10, 11];
- вакуумное формование элементов броневедомобиля из стеклопластика СТ-69н с элементами из титанового сплава ВТ-22 [7].



Рис. 5 – Стекло и углепластиковые конструкции для автомобильной отрасли

Разработанные технологии были использованы как в экспериментальных изделиях (рессора, диски, облицовка автомобиля), так и серийном производстве (крыши УАЗ 31512 – 200 комплектов), элементы из углепластика для ВАЗ 2110 – 50 комплектов) и конструкции броневедущего УАЗ 31512 – 73 шт.).

Во всех случаях применение ПКМ различных по составу и полимерным связующим показали достаточно высокую эффективность в сравнении с металлическими аналогами по эксплуатационным и весовым характеристикам, коррозионным свойствам, дизайнерским решениям.

Таким образом, приобретённый опыт в освоении авиационных материалов (ПКМ) и технологии успешно использован в различных отраслях промышленности при получении нужного технико-экономического эффекта и может быть рекомендован для серийного применения различных видов ПКМ в изделиях машиностроения.

#### 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. С. 3-33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки - основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
4. Складов Н.М. Путь длиною в 70 лет: от древесины до суперматериалов. М.: МИСиС, 2002 . 488 с.

5. Чурсова Л.В., Гребенева Т.А., Панина Н.Н., Цыбин А.И. Связующие для полимерных композиционных материалов строительного назначения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015 № 8. С. 13–17.

6. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е. Применение полимерных композиционных материалов строительных конструкциях. Труды ВИАМ. №8. 2013.

7. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2014. № 4. Ст. 6.

8. Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Григорьев М.М., Чурсова Л.В., Бабин А.Н. Связующие для безавтоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. №10. 2013. С. 18–27.

9. Хрульков А.В., Григорьев М.М., Язвенко Л.Н. Перспективы внедрения безавтоклавных технологий для изготовления конструкционных материалов (обзор). Труды ВИАМ. №2(38). 2016. С.45–52.

10. Коган Д.И., Душин М.И., Борщёв А.В., Вешкин Е.А., Абрамов П.А., Макрушин К.В.. Свойства конструкционных углепластиков, изготовленных пропиткой под вакуумом. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т.14. №4(2). 2012.С.762–766.

11. Мишкин С.И., Раскутин А.Е., Евдокимов А.А., Гуляев И.Н. Технологии и основные этапы строительства первого в России арочного моста из композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2017. №6. Ст.5.

УДК 621.3.048.81

**Разработка и внедрение высоконагревостойких кремнийорганических прессматериалов для электрической техники, устойчивой к экстремальным температурам и воздействию пожара**

Астахов П.А.<sup>1</sup>; Сальников А.А.<sup>1</sup>

[splast@list.ru](mailto:splast@list.ru)

<sup>1</sup>ООО «Суперпласт»

***Аннотация:***

*Доклад посвящен требованиям к высоконагревостойкой электрической изоляции, работающей в условиях экстремальных температур, и одному из возможных путей получения прессматериалов на кремнийорганических связующих, обеспечивающих выполнение требований.*

***Ключевые слова:***

*Кремнийорганические прессматериалы*

Современные требования к электротехническим материалам и электроустановкам в настоящее время расширены за счет требований к высокой нагревостойкости, в том числе в экстремальных условиях пожара и агрессивных токопроводящих сред. Кремнийорганические материалы являются одними из наиболее эффективных путей решения данных задач. В ходе проведенных НИР достигнуты результаты по оптимизации процессов производства метилфенильных кремнийорганических смол

высокой нагревостойкости. Характеристики связующих и оптимизация технологии, регулировка процессов отверждения позволили освоить выпуск кремни органических прессматериалов (волоконитов) непрерывным способом, отказавшись от затратных технологий смешивания и вальцевания. Положительный опыт применения прессматериалов показывает принципиальную эффективность путей решения проблем нагревостойкой электрической изоляции с использованием кремнийорганических связующих нового поколения.

Любая современная электрическая машина или установка содержит в своем составе большое количество различных полимерных материалов и композитов, в первую очередь в составе системы электрической изоляции. В современных условиях ввиду уменьшения весогабаритных норм, в сочетании с ростом тепловых и механических нагрузок и требованиям к устойчивости к экстремальным условиям, существенно возросли требования к применяемым электроизоляционным материалам.

Актуальной задачей является разработка систем электрической изоляции двигателей, генераторов и сопутствующих электрических аппаратов, устойчивых к воздействию пожара – предназначенных для функционирования систем жизнеобеспечения и спасения (вентиляция, дымососы, гидротехника и пр.). Не менее важной задачей является внедрение безасбестовых высоконагревостойких материалов в электротехнике для работы в аппаратах с экстремально высокими температурами.

Требования [1, 2] к системам электрической изоляции машин и аппаратов, устойчивых к действию пожара и экстремальных температур:

– высокая надежность машины в обычных условиях эксплуатации по конструкционным классам нагревостойкости Н-С (180–220°С) и др. в течение обычного ресурса — обычно от 20000 часов и выше;



– низкая величина токов утечки при повышенных температурах и влажности, попадании токопроводящей пыли и электролитов из внешней среды;

– пригодность технологии переработки для применения на установившемся производстве обычных электрических машин с использованием традиционных материалов;

– возможность функционирования машины в экстремальных режимах окружающей среды:

1. работоспособность электрической машины и аппарата при температурах 350–400°C, 450–500°C в условиях потока раскаленных газов, в течение не менее 2 часов;
2. попадание в электрические машины и аппараты токопроводящей пыли, электролитов, солей, кислот, щелочей в сочетании с экстремальным нагревом (свыше 300°C)
3. обширное попадание воды и огнетушащих средств, в том числе внутрь машины, в момент тушения пожара. Устойчивость даже при нарушении герметичности корпуса машины.
4. высокая электрическая прочность при скачках напряжения в момент нестабильности работы сетей;
5. способность устройства сохранять работоспособность при кратковременном прямом попадании пламени на корпус.

Типичные электрические машины, аппараты и системы, требующие применения данного типа материалов: привод аварийной противопожарной вентиляции, дымососы, силовая электроника привода и резисторы тормозных систем тяжелого транспорта (карьерные самосвалы и пр.), электрооборудование горно-шахтного, рудничного, обогатительных производств, электрометаллургическое оборудование [1].

Учитывая актуальность данной темы, ООО «Суперпласт» поставило цель в разработке прессматериала на основе кремнийорганических связующих для изготовления электротехнических деталей высокой нагревостойкости [3].

Известны кремнийорганические прессматериалы (кремнепласты) по ОСТ 6-06-445-90. Данный стандарт включает в себя широкий спектр материалов на различных типах смол и наполнителей, однако основной технологией их получения является смешивание прессматериала в смесителях с последующим вальцеванием. Данная технология обусловлена присутствием летучих продуктов конденсации кремнийорганических смол, большим количеством силоксановых циклов в не до конца конденсированных метильных смолах, которые нужно удалить до переработки материала. Такая технология малопродуктивна, вызывает разброс показателей от партии к партии.

Большой удельный вес занимают прессматериалы на основе метильной смолы КМ-9К. Данная смола отличается широким разбросом времени желатинизации — от 1 до 8 минут, присутствием геля в состоянии поставки, большим количеством силоксановых циклов, выделяющих воду при конденсации. Это может негативно сказываться на стабильности получаемых прессовочных масс.

Для ухода от данных недостатков и выполнения цели, ООО «Суперпласт» провело работу по решению задач:

– получение метилфенильной смолы с высоким постоянством свойств, изготовление связующего на ее основе с хорошей повторяемостью характеристик от партии к партии;

– разработки технологии непрерывной пропитки и рубки наполнителя для одностадийного получения прессовочной массы;

– исследование процессов термодеструкции и электрических характеристик полученных материалов после термических и химических воздействий.

Методы исследования: согласно ГОСТ 6433 в части испытания характеристик пробивного напряжения, тангенса угла диэлектрических потерь и удельного объемного сопротивления, ГОСТ 27473 в части испытания трекинговостойкости полученного материала, ГОСТ 4647 и ГОСТ 4648 по определению характеристик разрушающего напряжения при изгибе и ударной вязкости, ГОСТ 29127 по ТГА анализу кремнийорганического связующего.

*Разработка кремнийорганического связующего.* Традиционная технология синтеза кремнийорганической смолы метилфенильного типа, разработанная во ФГУП «ВИАМ» и реализованная во ФГУП «ГНИИХТЭОС», представляет собой сложный 6-стадийный процесс. Сущность процесса заключается в получении ацетоксильных производных хлорсиланов через реакцию с уксуснокислым калием, последующим алкоголизом ацетоксильных производных в силанолы с применением метилового спирта, конденсации силанолов с удалением метилацетатата и конденсационной воды, многократной промывки реакционной массы для удаления хлорида калия и очистки от ионов хлора. Трудности этого процесса:

- 1) Измельчение и сушка (прокаливание) уксуснокислого калия, который интенсивно поглощает воду из воздуха.
- 2) Необходимость применения безводного метанола, являющегося сильнейшим ядом.
- 3) Фильтрация мелкодисперсного хлористого калия из реакционной массы.

- 4) Требуется большое количество промывок водой до отрицательной реакции на ион  $\text{Cl}^-$ .
- 5) Кроме того, при промывке раствора смолы в толуоле образуются устойчивые суспензии, что требует длительного отстаивания или наличия дорогостоящего сепарирующего оборудования.

Существующая в России технология синтеза метильных смол так же имеет недостатки. Так, смола КМ-9К кислая (норма  $\text{pH} > 3,5$ ), содержит нерастворимую гель-фракцию. Уже в процессе гидролиза хлорсиланов происходит частичная конденсация в сшитый продукт, непригодный для переработки. Смола содержит существенное количество силоксановых циклов, которые при раскрытии дают реакцию воду. Необходимость раскрытия циклов при изготовлении прессматериала требует длительного горячего вальцевания прессматериала.

Разработанная ООО «Суперпласт» технология синтеза кремнийорганических смол М-10 (метильная), МФ-11 и МФ-12 (метилфенильные с молярным соотношением метила/фенила 1:1 и 1:2 соответственно) состоит из 4 технологических стадий:

- Алкоголиз смеси хлорсиланов 1-бутанолом.
- Гидролиз полученной на 1-ой стадии смеси алкоксисиланов водой в кислой среде.
- Шесть водных промывок раствора кремнийорганической смолы в смеси растворителей толуол – 1-бутанол до нейтральной реакции.
- Отгонка органических растворителей под вакуумом с получением твердой смолы.

Полученная технология позволяет получать кремнийорганические смолы с устойчивыми показателями, кроме того, технология может быть адаптирована для работы с алкоксисиланами в качестве сырья вместо хлорсиланов.

Характеристики смол, полученных по новому процессу, отражены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование показателей	Результаты испытаний образцов смол		
	М-10	МФ-11	МФ-12
Концентрация ионов водорода (рН)	5,0	6,10	6,3
Время желатинизации при (200±3)°С, мин.	4,33	25	160
Массовая доля летучих веществ, %	1,9	2,9	1,8
Растворимость в этиловом спирте	Полная, опалесценция	Полная, раствор прозрачный	Полная, раствор прозрачный
Реологические показатели (динамическая вязкость, при 110°С, Па с)	-	11,0	22,0

Для применения при изготовлении прессматериала одностадийным непрерывным методом необходимо регулирование времени желатинизации связующего в узком диапазоне показателя. Применением катализаторов и ингибиторов, вводимых в изготовленные смолы, получен результат по более чем 50 партиям связующего МФ-12 с временем желатинизации при 150°С в интервале 4 минуты 20 секунд — 5 минут 20 секунд. Таким образом, разброс вариации составляет менее 15%, что существенно превосходит уровень воспроизводимости показателей смол типа КМ-9К — от 1 до 8 минут (разброс в 8 раз).

Проведенный термогравиметрический анализ полученных смол после отверждения показан на рисунке 1. Смолы отличаются малыми потерями массы при сильных нагревах, при этом часть потерь массы складывается из выхода конденсационной воды за счет продолжающихся процессов сшивки.

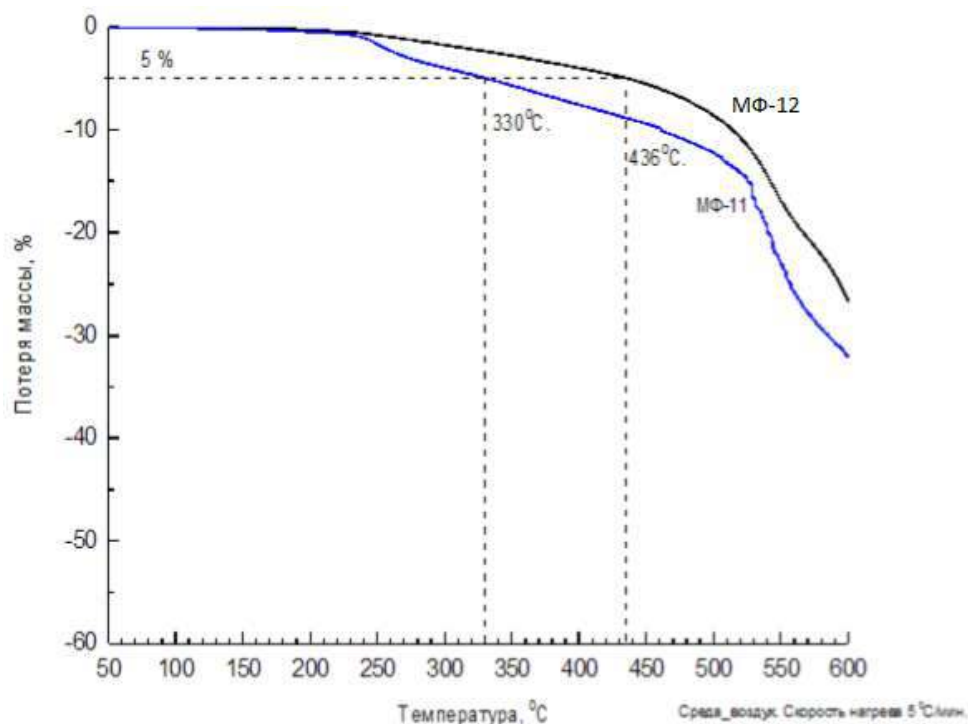


Рис. 1 – Термогравиметрический анализ смол МФ-11 и МФ-12

*Разработка технологии одностадийного получения прессматериала.*

Для разработки нового техпроцесса были изготовлены партии связующего с временем желатинизации при 150°C около 5 минут. В связующее вводились целевые добавки — минеральный наполнитель, пигменты и разделительные добавки на основе стеарата цинка.

В качестве наполнителя по результатам работ были выбраны:

- кремнеземные крученые комплексные нити с силановыми замасливателями;
- алюмоборосиликатные крученые комплексные нити с силановыми замасливателями;
- базальтовые крученые комплексные нити с силановыми замасливателями.

Применение нитей с замасливателями на основе силанов позволило, с одной стороны, обеспечить гидрофобность поверхности наполнителя, с другой — химическую связь связующего с поверхностью волокна. Кроме

того, замасливатели, содержащие силаны типа аминопропилтриэтоксисилана (АГМ-9) и подобных ему обеспечивают катализ реакции сшивки конденсационных кремнийорганических смол с достижением более глубокого протекания реакции конденсации при температурах переработки.

Основу технологического процесса составляют:

- смотка нитей наполнителя и трощение;
- пропитка раствором или расплавом связующего;
- сушка в тоннельных печах;
- рубка на фрагменты для прессования.

Полученный на основе кремнеземной нити и связующего МФ-12 прессматериал получил название ПКО-2-2-СГ и был первым испытан и внедрен в производство. Характеристики материала приведены в таблице 2.

Таблица 2

Наименование показателя	Результат
Внешний вид	Волокнистый иглообразный материал
Плотность в отпрессованном состоянии при (25±1)°С, г/см <sup>3</sup>	1,80 – 2,00
Массовая доля летучих веществ, %	1,0-4,0
Текучесть по Рашигу, мм	120-160
Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	Свыше 70,0
Изгибающее напряжение при разрушении, МПа	Свыше 70,0
Электрическая прочность перпендикулярно плоскости образца, кВ/мм (толщина образца 2,2 мм)	в исходном состоянии — 9,6 после термоудара 450°С в течение 2 часов — 5,8
Пробивное напряжение параллельно плоскости образца (перпендикулярно усилию прессования по ГОСТ 6433.3 п. 1.5 Черт.1) при 25°С в трансформаторном масле, кВ	в исходном состоянии — 25,0 после термоудара 450°С в течение 2 часов — 22,0
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	Свыше 1х10 <sup>15</sup>
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом*см	Свыше 1х10 <sup>15</sup>
Дугостойкость, с	245-250
Трекинговая стойкость СТИ, В	275 (отдельные образцы 450)
Тангенс угла диэлектрических потерь	При 25°С — 0,002 При 250°С — 0,03
Кислородный индекс	Свыше 90%



Показатель трекинговостойкости позволяет использовать материал в условиях высокой влажности и токопроводящих загрязнителей.

Кислородный индекс свыше 90% указывает на практически полную негорючесть материала. Согласно данным ТГА (рис. 1), материал практически не выделяет дыма при нагреве — настолько малы потери массы [4].

Эксплуатация электротехнических изделий в условиях агрессивных сред, связанных с присутствием масло- и нефтепродуктов, требует дополнительной проверки масло- и бензостойкости полученного прессматериала.

Для испытаний были изготовлены образцы пластика ПКО-2-2-СГ толщиной 4 мм, габаритами 80x20 мм, и помещены на 1 месяц при 60°C в испытательную среду. Результаты испытаний в таблице 3.

Таблица 3

Среда испытаний	Результат
Дизельное топливо	Изменение массы и геометрических размеров в пределах погрешности
Масло веретенное И-20А	То же
Масло трансформаторное	---»---

*Испытания прессматериала ПКО-2-2-СГ в составе высокотемпературной электрической изоляции.* Для переработки материала в электротехнические пресс-изделия был подобран режим прессования, схожий с традиционно применяемыми марками прессовочных масс АГ-4В, ГСП-8 и др.

Навеска материала согласно весу и плотности изделия засыпается в прессформу, обработанную антиадгезивом и разогретую до 150-160°C. После загрузки прессформа закрывается и создается удельное давление 25–

30 МПа. В случае трудности загрузки всего объема навески допускается загрузка в несколько приемов с подпрессовками на 5–10 секунд. Прессование при удельном давлении 25–30 МПа ведется с поддержанием постоянного давления 20–40 минут (из них 4–10 минут требуется на гелирование связующего), после чего предварительно отвержденное изделие извлекается из формы. Затем изделие подвергают термообработке 200–250°C в течение 4–6 часов. Данный режим опробован на изделиях весом до 2 кг и может требовать корректировки при более крупных или сложных конструкциях.

*Опыт применения.*

1. ПКО-2-2-СГ был использован для изготовления клеммных выводных колодок БМШИ 686462.002 для пожаростойкого асинхронного двигателя систем вентиляции тоннелей. Конструкция выдержала испытания в составе системы электрической изоляции при температуре 400°C.

2. Блоки из ПКО-2-2-СГ были использованы в качестве теплозащитной оснастки при термообработке печатных плат горячим воздухом (операция удаления припоя) на предприятиях электронного производства «Роскосмоса».

3. ПКО-2-2-СГ испытан и активно применяется как материал для корпусных боковин тормозных резисторов карьерных самосвалов. Материал отличается от применявшихся ранее фенольных термореактопластов долговечностью в условиях перегрева свыше 250°C.

Перспективы развития материалы:

– внедрение в серийное производство других видов волокнистых наполнителей с целью выхода на более высокий уровень механических свойств;

– переход на смолы с большим содержанием метильных групп по отношению к фенильным для улучшения показателей дуго- и трекинговостойкости;

– освоение композиций кремнийорганических смол и неорганических полимеров.

### **Заключение**

Отвечая современным вызовам по надежности и устойчивости электроаппаратуры в экстремальных условиях, специалистами ООО «Суперпласт» проведена работа по оптимизации производства кремнийорганических связующих и налажена работа по выпуску прессматериала на их основе, предназначенного для получения высоконагревостойких электроизоляционных деталей.

Успешен опыт внедрения производства метилфенильных кремнийорганических смол по технологии алкоголиза хлорсиланов и последующего гидролиза алкоксисиланов. Постоянство свойств связующих, гибкая регулировка свойств добавками, низкое содержание летучих веществ, отсутствие геля — все это позволяет осуществлять производство прессматериалов типа «волоконитов» непрерывным способом вместо затратного метода смешивания и вальцевания периодическим способом.

Полученный материал характеризуется высокими электрическими свойствами после воздействия экстремальных температур свыше 350°C. Материал имеет потенциал для роста характеристик дуго- и трекинговостойкости, механической прочности.

Опыт внедрения и применения материала свидетельствует об актуальности задачи и эффективности ее решения.

### Литература

1. Прохоров А.В. Критерии надежности систем изоляции электрических машин. Выбор оптимального варианта системы изоляции. // Надежность. -2012 -№3. с. 80.
2. Прохоров В.В. Критерии, определяющие выбор электроизоляционных материалов и технологий создания систем изоляции электрических машин постоянного и переменного тока. // Электротехника. -2014. №4. с. 52.
3. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. Санкт-Петербург: Профессия. 2006.
4. Астахов П.А., Сальников А.А. Современные функциональные полимеры и композиты для электромашиностроения и электроаппаратостроения. // Сборник трудов «Интерэлектромаш». -2018.

УДК 678

## **Оценка нагруженности арочных элементов моста с использованием оптоволоконных датчиков деформации**

Махсидов В.В.<sup>1</sup>, к.т.н.; Кашарина Л.А.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н.;

Смирнов О.И.<sup>1</sup>, Раскутин А.Е.<sup>1</sup>, к.т.н.

[admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

### **Аннотация:**

*В работе рассмотрен метод оценки нагруженности несущих строительных конструкций с использованием оптоволоконных датчиков деформации на основе брэгговской решетки. Объектом исследования являются арочные элементы инновационного быстровозводимого автомобильного моста, построенного в пос. Языково Ульяновской области. Особенностью конструкции моста является арочный элемент, который представляет собой бетонный сердечник, армированный полимерным композиционным материалом (ПКМ) ВКУ-51. Метод использует текущую деформацию материала арочного элемента, измеряемую в соответствующих сечениях, и путем сравнения с расчетной деформацией оценивает ее нагруженность. Приведены данные по деформации ПКМ оболочки арочного элемента за период полугодового мониторинга моста. Продемонстрированы преимущества использования оптоволоконных датчиков деформации в сравнении с традиционными*

*тензодатчиками. Показаны результаты оценки нагруженности арочных элементов моста за период мониторинга моста.*

***Ключевые слова:***

*мониторинг конструкций, полимерные композиционные материалы, волоконная брэгговская решетка, нагруженность арочных элементов, работоспособность арочных элементов, деформация, арочный мост.*

**Введение**

Преимуществом полимерных композиционных материалов (ПКМ) в сравнении с традиционными конструкционными материалами (сталь, алюминиевые и титановые сплавы и т. п.) является низкий удельный вес, высокая прочность, коррозионная стойкость и долговечность. Данные преимущества способствуют росту объема применения ПКМ в различных отраслях промышленности, как в авиастроении, так и строительстве [1–3]. Но существует ряд факторов, которые ограничивают их широкое применение в конструкциях, эксплуатирующихся длительное время, например, в авиационной технике и в строительных объектах. В силу своей природы и особенностей технологии производства ПКМ в сравнении с алюминиевыми сплавами или сталями не могут накапливать повреждения, обладают гораздо большим разбросом значений свойств, способностью поглощать влагу из окружающей среды и под воздействием механической нагрузки разрушаются практически мгновенно [4–6].

Мониторинг деформаций в строительных конструкциях на сегодняшний день осуществляется с помощью визуальных методов, сигнальных меток или различных тензорезисторных устройств. Строящиеся, а также большая часть уже имеющихся построек, особенно объекты повышенной опасности, в настоящее время требуют нового подхода к безопасности, которая не может быть осуществлена за счет периодического осмотра и установкой геодезических маяков. Для

прогнозирования возможных разрушений на ранней стадии, особенно при возникновении форс-мажорных ситуаций, требуется непрерывный мониторинг всей инженерной конструкции.

Перспективным с точки зрения встроенного контроля материала конструкции являются оптические волоконные датчики на основе брэгговской решетки [7, 8]. Волоконные брэгговские решетки (ВБР) в сравнении с традиционно применяемыми тензодатчиками более компактны, не подвержены электромагнитным помехам и могут интегрироваться в единое оптоволокно [9, 10], также в настоящее время набирают обороты разработки материалов для высокотемпературной волоконной оптики [11, 12]. Вместе с этим, оптоволокно достаточно легко интегрируется в ПКМ (например, в угле-, стекло-, органопластики и т. п.) в процессе изготовления элемента конструкции, поэтому внедрение такой системы мониторинга мостового сооружения (арочного моста) является актуальным и перспективным для решения вопросов наблюдения и контроля состояния конструкции. Система мониторинга на основе оптоволоконных датчиков применительно к строительным конструкциям позволит упростить монтаж как за счет объединения множества датчиков деформации в единое оптоволокно, так и за счет интеграции датчиков в строительную конструкцию в случае ее изготовления не на месте строительства объекта.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 4.1 «Интеллектуальные ПКМ II и III поколений» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

### **Материалы и методы**

По результатам исследований разработана оптоволоконная система мониторинга арочных элементов автомобильного двухполосного моста, построенного в пос. Языково Карсунского района Ульяновской области в



рамках сотрудничества между ФГУП «ВИАМ» и АО «НИИГрафит». Характеристики и состав разработанной оптоволоконной системы мониторинга приведен в работе [13].

Оптоволоконная система мониторинга предназначена для оценки нагруженности арочных элементов в реальном масштабе времени и предупреждает о приближении к критическому уровню нагружения. Система мониторинга отслеживает деформацию ПКМ, оценивает состояние материала и конструкции, отображает текущие значения деформации и в случае приближения к критическому уровню нагруженности арочных элементов сигнализирует об этом, а также записывает текущие значения датчиков и результаты анализа нагруженности в файл. Установленная система мониторинга отслеживает состояние 3-х арочных элементов, располагающихся на периферии и в центре моста. В каждый арочный элемент интегрировано по 6 оптоволоконных датчиков деформации.

Оптоволоконные датчики деформации размещаются на поверхности оболочки арочного элемента из углепластика ВКУ-51 на  $\frac{1}{4}$  (сечение 2-2 и 2'-2') и  $\frac{1}{2}$  (сечение 3-3) длины его проекции на ось X в верхней и нижней точках сечения. Мониторинг арочных элементов в конструкции моста осуществляется в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1.

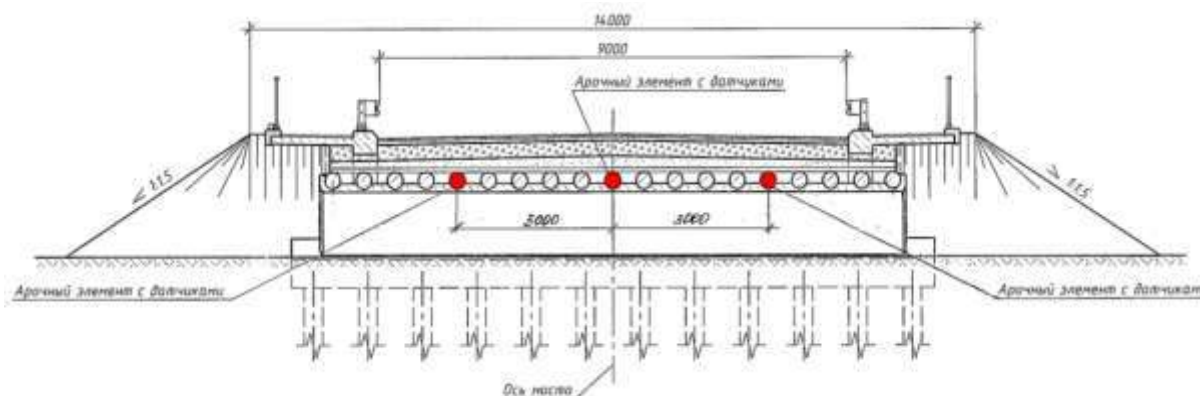


Рис. 1 – Расположение арочных элементов с интегрированными оптоволоконными датчиками в конструкции двухполосного автомобильного арочного моста

### **Выбор критерия работоспособности конструкции моста**

Выбор критерия работоспособности конструкции двухполосного автомобильного арочного моста, произведен исходя из возможного принципа оценки работоспособности конструкции с учетом возможностей используемого оборудования.

Одним из возможных принципов оценки работоспособности конструкции является определение нагруженности путем измерения ее деформации. В этом случае считается, что при нагрузках не превышающих критическое значение, соответствующее разрушению, конструкция сохраняет работоспособность. В данной системе мониторинга был принят указанный принцип. При этом определение нагруженности конструкции непрерывно проводится путем измерения ее деформации в определенном сечении. Необходимо отметить, что данный принцип оценки работоспособности будет справедлив для тех материалов и конструкций, которые не чувствительны (или имеют незначительную чувствительность) к циклическим нагрузкам, т. е. не накапливают повреждений в процессе нагружения.

В процессе проектирования двухполосного автомобильного арочного моста на расчетную нагрузку 100 т были определены расчетные нагрузки и деформации несущих элементов конструкции – арочных элементов из бетона, армированных углепластиком с интегрированными оптоволоконными датчиками деформации (марка ВКУ-51И). Расчетные осевые деформации на внешней поверхности оболочки арочного элемента из углепластика на  $\frac{1}{2}$  и  $\frac{1}{4}$  длины проекции арочного элемента на ось X в верхней и нижней точках сечения представлены в таблице. При этом расчетная схема нагружения соответствовала расположению 4-х осного транспортного средства массой 100 т по центру проезжей части моста.

Расчетные осевые деформации на внешней поверхности оболочки арочного элемента из углепластика ВКУ-51И

Положение в сечении арочного элемента	Относительная осевая деформация на поверхности углепластика арочного элемента, %	
	на $\frac{1}{4}$ длины проекции на ось X	на $\frac{1}{2}$ длины проекции на ось X
	с 10 % запасом	
Верхняя точка сечения	-0,368	-0,0367
Нижняя точка сечения	0,334	0,309
	расчетные значения при нагрузке на мост 100 т	
Верхняя точка сечения	-0,3312	-0,3303
Нижняя точка сечения	0,3006	0,2781

Проведенные ранее испытания конструктивно-подобных образцов (КПО) арочных элементов разрушились при нагрузке (24,5–31,2 т) и прогибе (16,0–52,3 мм), характерном для такого вида конструкций и технологии их изготовления.

Тензометрия КПО арочных элементов в процессе их нагружения показала, что в сечении 3-3 (вершина арки) имеется не монотонная зависимость изменения деформации с ростом нагрузки как в верхней точки сечения арочного элемента, так и в нижней. Максимальная деформация в верхней точке сечения 3-3 составила 250 мкм/м (0,025%), в нижней точке – 1200 мкм/м (0,12%); минимальная в верхней точке – -1300 мкм/м (-0,13%), в нижней точке – 140 мкм/м (0,014%).

В сечении 2-2 (на  $\frac{1}{4}$  длины проекции КПО арочного элемента) тензометрия показала наличие монотонной зависимости изменения деформации с ростом нагрузки, как в верхней точки сечения арочного элемента, так и в нижней. Максимальная деформация в верхней точке сечения 2-2 составила 4200 мкм/м (0,42%), в нижней точке – -1000 мкм/м (-0,1%); минимальная в верхней точке – 1800 мкм/м (0,18%), в нижней точке – -2700 мкм/м (-0,27%).

Использование полученных данных тензометрии при испытании КПО арочных элементов для оценки работоспособности конструкции затруднительно, т. к. расчетные и экспериментальные схемы нагружения

арок различаются. По этой причине для оценки работоспособности конструкции целесообразно ориентироваться на расчетные значения деформации.

В результате проведенного анализа расчетных и экспериментальных максимальных и минимальных осевых деформаций за критерий предельного состояния конструкции моста принято расчетное значение деформации  $-0,3312\%$  в сечении 2-2 по верхней точке сечения (таблица). Отметим, что разрушение углепластика ВКУ-51 и ВКУ-51И при растяжении происходит в диапазоне относительных деформации  $1,0-1,2\%$ , и несколько меньшей при сжатии.

Оценка работоспособности пилотного объекта осуществлялась по определению нагруженности арочных элементов и сравнению с расчетной относительной осевой деформации ( $\varepsilon_p = -0,3312\%$ ) и с предельно допустимой относительной деформацией, соответствующей разрушению углепластика ВКУ-51И ( $1,0\%$ ). При этом исходя из запаса по нагрузке (деформации) будет рассчитываться нагруженность ( $N$ ) контролируемых арочных элементов по следующей формуле и приниматься для оценки состояния конструкции максимальная по 3-м арочным элементам [14–17]:

$$N = 1 - \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_{\text{тек}}}{\varepsilon_p} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{тек}}$  – текущая деформация, измеряемая датчиком деформации.

Текущая деформация и температура рассчитывается по формулам, приведенным в работе [13].

### **Непрерывный мониторинг арочных элементов. Оценка работоспособности арочных элементов**

Мониторинг деформации арочных элементов осуществлялся путем подключения измерительного оборудования к датчикам и записи их показаний, на основе которых проводился анализ данных.

По окончании возведения двухполосного автомобильного арочного моста и его благоустройства (в т. ч. после укладки асфальта на дорожное покрытие) был проведен замер показаний оптоволоконных датчиков деформации, таким образом сформирован «нулевой уровень» состояния арочных элементов моста. При сравнении показаний оптоволоконных датчиков, на момент изготовления арочных оболочек и в возведенном мосту, следует, что установленные арки незначительно деформированы, что связано с монтажными напряжениями в результате их установки в конструкцию (рисунок 2). При этом практически во всех контролируемых точках арочного элемента имеются незначительные сжимающие деформации. Указанные деформации не превышают расчетные (0,3312%) и критические (1,0%) значения.

Важно отметить, что последующий мониторинг осуществлялся относительно «нулевого уровня» показаний оптоволоконных датчиков деформации.

На рисунке 3 приведены результаты мониторинга арочных элементов за период с июня по ноябрь 2017 г. Как следует из полученных данных в теплые месяцы года (июнь–сентябрь) сжимающая относительная осевая деформация арочных элементов уменьшается практически до нуля или незначительно переходит к растягивающей, а с понижением температуры окружающей среды относительная осевая деформация арочных элементов снова переходит через ноль и увеличивается (по модулю). Максимальное такое колебание составило 0,08% для сечения 3-3 арки № 2; для сечения 2-2 арки № 2 изменение относительной осевой деформации составило до 0,07 %, для арки № 4 – до 0,04%, для арки № 11 – до 0,06%. С июня по ноябрь относительная осевая деформация арочных элементов практически не изменялась. С учетом небольших значений измеряемой относительной деформации полученная зависимость предположительно связана с термическими деформациями конструкции,

зависящими от понижения температуры воздуха в октябре–ноябре. Указанные деформации не превышают расчетные и критические значения.

Из данных мониторинга также следует, что сечения 2-2, 2'-2' (симметрично 2-2), 3-3 для всех контролируемых арочных элементов нагружены примерно в равной степени. В сечении 2'-2' арки №11 относительная осевая деформация больше (до 0,11-0,12%), чем в ее симметричном сечении 2-2 и в аналогичных сечениях арок №№ 2 и 4. Это деформация связана с наличием повышенных монтажных деформаций, что возможно обусловлено отклонением от геометрии арочного элемента, в т.ч. его сечения.

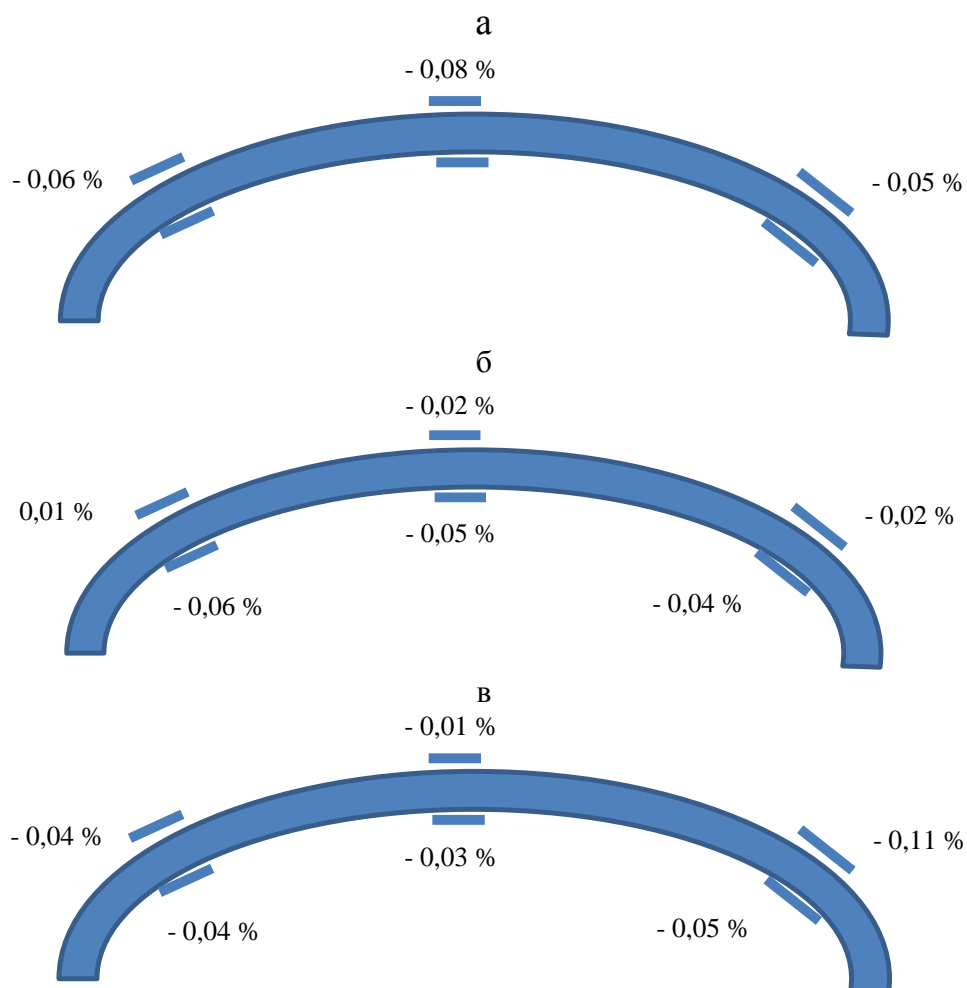
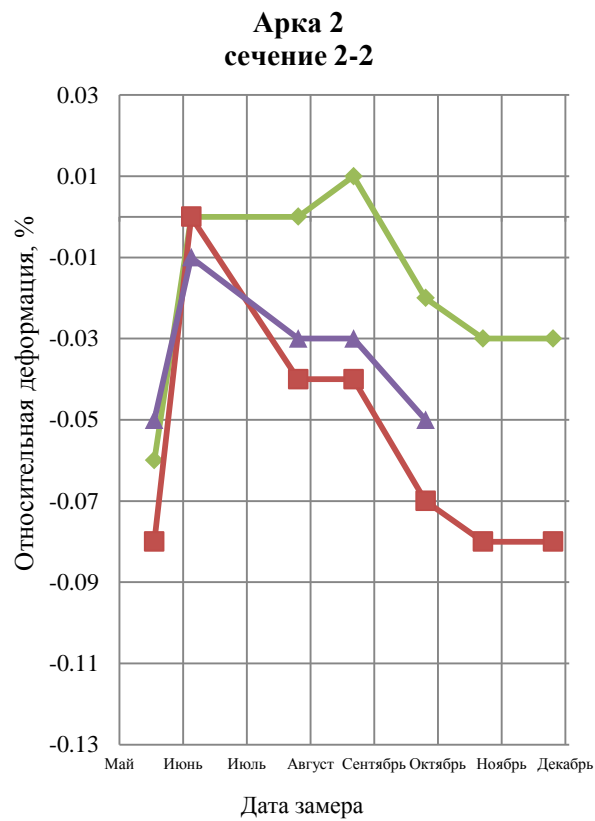


Рис. 2 – Относительная осевая деформация углепластика ВКУ-51И после возведения двухполосного автомобильного арочного моста (монтажная деформация):

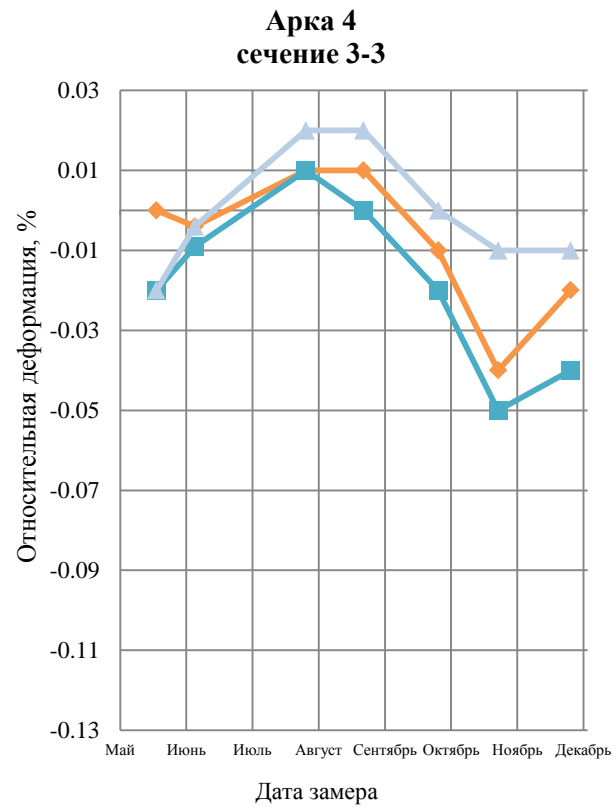
а – арка №2; б – арка №4; в – арка №11

Согласно предложенному методу оценки и с учетом действующих монтажных деформаций максимальная нагруженность арочных элементов в возведенном мосту составляет не более: 18% для арки №2, 12% для арки №4 и 36% для арки №11 (рисунок 4). Соответственно, арочный элемент №2 имеет запас по работоспособности (нагрузению) 82%, для арки №4 – 88%, для арки №11 – 64 %.

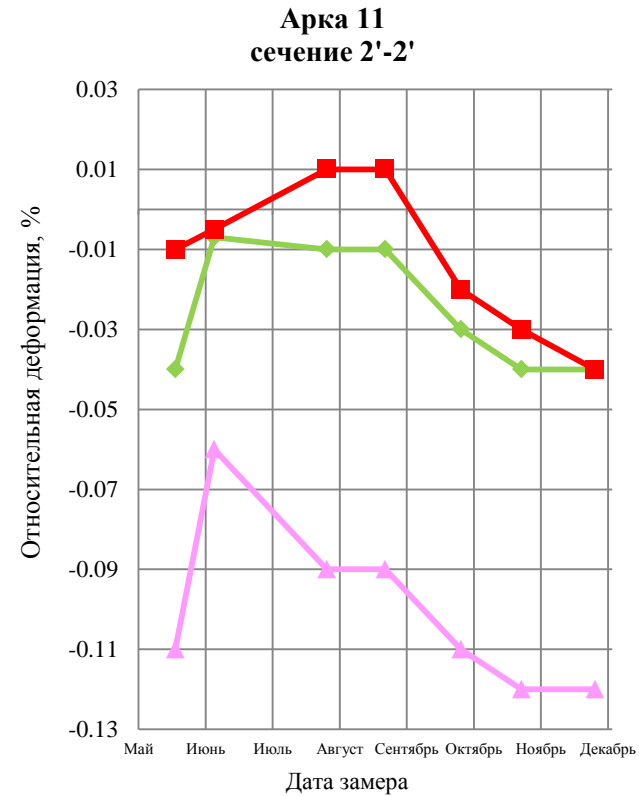




а



б



в

Рис 3 – Относительная осевая деформация углепластика ВКУ-51И в зависимости от даты замера  
(а – арка №2; б – арка №4; в – арка №11)

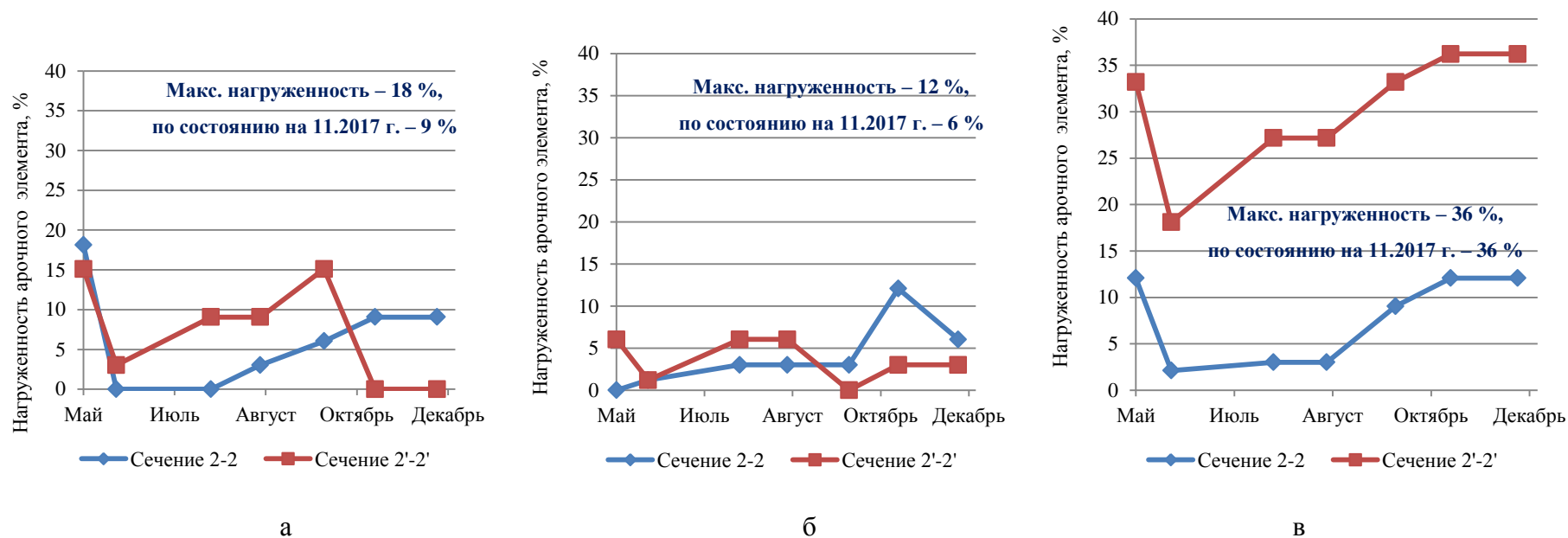


Рис. 4 – Нагруженность арочных элементов с оболочкой из ВКУ-51И в сечении 2-2 / 2'-2' в зависимости от даты замера (а – арка №2; б – арка №4; в – арка №11)

## Результаты и заключение

Проведен анализ данных за период июнь-ноябрь 2017 г., поступающих от оптоволоконной системы мониторинга арочных элементов с оболочкой из углепластика ВКУ-51И с использованием датчиков деформации и температуры на основе ВБР, установленной на двухполосном автомобильном арочном мосте в пос. Языково Ульяновской обл. Показано, что в результате установки арочных элементов в конструкцию на их поверхности в вершине и на  $\frac{1}{4}$  длины присутствуют сжимающие осевые деформации до 0,11%.

Максимальное колебание относительной осевой деформации составило 0,08 % для сечения 3-3 арки № 2. С июня по ноябрь 2017 г. относительная осевая деформация арочных элементов практически не изменялась. С учетом небольших значений измеряемой относительной деформации полученная зависимость предположительно связана с термическими деформациями конструкции. Указанные деформации не превышают расчетные (0,3312%) и критические (1,0%) значения.

Согласно предложенному методу оценки и с учетом действующих монтажных деформаций максимальная нагруженность арочных элементов в возведенном мосту составляет не более: 18% для арки №2, 12% для арки №4 и 36% для арки №11. Соответственно, арочный элемент №2 имеет запас по работоспособности (нагрузению) 82%, для арки №4 – 88%, для арки №11 – 64 %.

## 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. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.

3. Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Шеин Е.А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12.
4. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 440–448.
5. Дыщенко В.С., Раскутин А.Е., Зуев М.А. Дорожный детектор в системах безостановочного автоматического взвешивания // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №5 (41). С. 113–118. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-12-12.
6. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №8. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.02.2018).
7. Васильев С.А., Медведков И.О., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. №12. С. 1085–1103.
8. Способ измерения деформации конструкции из композиционного материала: пат. 2427795 Рос. Федерация; опубл. 03.12.09.
9. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. и др. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. №3. С. 10–15.
10. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. и др. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.

11. Щетанов Б.В., Купцов Р.С., Свистунов В.И. Методы получения монокристаллических волокон оксида алюминия для создания композиционных материалов и высокотемпературной волоконной оптики // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.02.2018).

12. Никитина В.Ю., Колышев С.Г., Купцов Р.С. Способы определения площади сечения монокристаллических волокон  $Al_2O_3$  для расчета прочности при растяжении // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.02.2018).

13. Раскутин А.Е., Махсидов В.В., Смирнов О.И., Кашарина Л.А. Мониторинг нагруженности композитной конструкции арочного моста на основе волоконно-оптических датчиков // Труды ВИАМ. 2018. №3 (63). С. 49-59. DOI: [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2018-0-3-49-59](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-3-49-59).

14. Ying Huang, Leonard Palek, Robert Strommen, Ben Worel, Genda Chen. Real-Time Weigh-In-Motion Measurement Using Fiber Bragg Grating Sensors // Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems. 2014. Vol. 9061. P. 96–102.

15. Zhi Zhou, Wanqiu Liua, Ying Huang, Huaping Wang, Jianping Hea, Minghua Huang, Jinping Ou. Optical Fiber Bragg Grating Sensor Assembly for 3D Strain Monitoring and Its Case Study in Highway Pavement // Mechanical Systems and Signal Processing. 2012. Vol. 28 P. 36–49.

16. Ke Wang, Zhanxiong Wei, Hongtao Zhang, Xiaoyang Huang, Bingquan Chen, Hong-Liang Cui. Fiber-Bragg-grating-based weigh-in-motion system using fiber-reinforced composites as the load-supporting material // Optical Engineering. 2006. Vol. 45. No. 6. P. 33–39.

17. Hongtao Zhang, Zhanxiong Wei, Lingling Fan, Shangming Yang, Pengfei Wang, Hong-Liang. Sensing System and a High Performance Optical Fiber Bragg Grating (FBG) Demodulator // Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems. 2010. Vol. 7647. P. 102–109.

УДК 338.24.01

## Система испытания ПКМ в рамках жизненного цикла продукции

Федотов Л.В.<sup>1</sup>, к.т.н.; Оленев А.А.<sup>1</sup>; Калугина Е.А.<sup>1</sup>

[наука73@inbox.ru](mailto:наука73@inbox.ru); [aa.olenev@mail.ru](mailto:aa.olenev@mail.ru);

<sup>1</sup>Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева

### **Аннотация:**

*Рассматривается подход к организации системы испытаний полимерных композиционных материалов, соответствующей современному уровню развития их производства в масштабах отрасли. На примере использования полимерных композитных материалов предлагаются положения для реализации систем испытаний, позволяющие обеспечить соответствующий уровень управления качеством с использованием других видов менеджмента.*

### **Ключевые слова:**

*менеджмент, конфигурация, системы менеджмента качества, менеджмент измерений.*

Процесс управления качеством промышленной продукции на этапах жизненного цикла осуществляется в условиях стохастической неопределенности многомерной измерительной информации и экспертных данных о показателях качества продукции, представляющих собой качественные и количественные характеристики различной размерности, получаемых в результате наблюдений, измерений, контроля, диагностики, испытаний и характеризующихся неполнотой, неточностью,

неоднородностью и, в конечном счете, неопределенностью. Вместе с тем, получаемые в процессе управления массивы информации являются ресурсом, который может служить основой для повышения эффективности управленческих, конструкторских и технологических решений, а также генерации новых знаний, использование которых позволит на более высоком научно-техническом уровне управлять качеством продукции [1].

Растущий спрос композиционных материалов в авиационной отрасли делает актуальным формирование систем испытаний инновационной продукции, обеспечивающих мониторинг в условиях длительного жизненного цикла (ДЖЦ), к которым относятся воздушные суда и используемые в процессе их производства и эксплуатации материалы, компоненты, оборудование.

При разработке современных композиционных материалов в начале 80-х гг. XX века сформулирован принцип, предусматривающий комплексное решение вопросов выбора композиционных материалов, проектирования из них конструкций и разработки технологических процессов. Это три стороны единой проблемы и во многих случаях одновременно разрабатываются новая конструкция, композиционный материал для ее изготовления и технологический процесс получения детали [2]. Вместе с тем в случае создания воздушных судов (ВС), для обеспечения менеджмента, качества которых используются такие инструменты, как замкнутый цикл управления, управление конфигурацией, управление требованиями и измерениями, представляется целесообразным рассмотреть еще одну сторону проблемы. Такой стороной в случае инновационной продукции, является решение вопросов испытаний, связанных с подтверждением наличных значений величин, составляющих характеристику изделия, агрегируемого в структуру (конфигурацию) ВС на конкретном этапе его жизненного цикла [3].

Процессы внедрения инноваций, модернизации естественные для продукции ДЖЦ, но в зависимости от уровня интеграции изделия из ПКМ



и/или места его в цепочке создания ценности для потребителя возникают определенные риски от их внедрения. В случае авиационной техники цепочку замыкает авиаперевозка и, в конечном счете, авиационная мобильность и на протяжении этой цепочки составляющие конечный продукт изделия изменяются по характеру (продукт/услуга), по количеству, по физической природе и т.д.

Рост потребления композиционных материалов (КМ) в авиационной отрасли обусловлен их ставшим очевидным отличием от традиционных материалов, которое состоит в том, что процесс получения КМ технологически совмещается с процессом изготовления изделия. Проектирование изделия из КМ начинается с конструирования самого материала – выбора его компонентов и назначения оптимальных технологических процессов производства. Особенность создания конструкций из КМ в отличие от конструкций из традиционных материалов заключается в том, что конструирование материала, разработка технологического процесса изготовления и проектирование самой конструкции – это единый взаимосвязанный процесс. Физико-механические свойства КМ в зависимости от концентрации компонентов, их геометрических параметров и ориентации, а также технологии изготовления могут меняться в очень широких пределах. Тем самым открывается возможность специального создания (конструирования) материала с заданными свойствами для определенного изделия. Вместе перечисленные выше основные отличия и формируемые возможности не могут быть эффективно реализованы без решения вопроса системы испытаний.

Для реализации задачи формированию системы испытания ПКМ, представляется целесообразным осуществить набор положений:

- формирование перечня характеристик в виде наборов физических величин;
- выделение характеристик, подлежащих испытаниям, на

соответствующем уровне агрегирования материалов и изделий из них в структуру конечного продукта;

- формирование системы измерений из находящихся в обращении физических величин в процессе изготовления ПКМ для использования в конструкции ВС на различных этапах жизненного цикла продукции;

- определение характеристик подлежащих испытанию на различных этапах жизненного цикла и в различных элементах конфигурации готового изделия;

- формирование конфигурационных с учетом используемых результатов измерения, контроля, диагностики и испытаний;

- формирование процессов системы процессов валидации, и верификации использующих результаты испытаний.

Каждое из перечисленных положений известны и для различных видов продукции используется в различных сочетаниях. Так, например первое положение – требование метрологического анализа для любого вида продукции. Далее по физическим величинам решается вопрос выбора средств измерений и в случае несложной продукции перебирать все положения выше может оказаться нецелесообразным. В случае испытаний сложной продукции мы имеем дело с характеристиками, предполагающими определенные совокупности физических величин, существующие в заданных условиях, меняющихся на протяжении жизненного цикла. Далее значения характеристик проявляются в значениях параметров продукции, в показателях ее качества, в конечном счете. Если не заниматься организацией испытаний в комплексе с тремя перечисленными в начале статьи вопросами с момента создания продукции, то это приведет к известной ситуации, когда соотношение производственных операций к непроизводственным – контрольным все больше будет смещаться в непроизводственные. Так уже было в авиастроении и эта ситуация привела к реализации технологий управления качеством в свое время.

Представленный подход позволяет реализовать системы испытаний, обеспечивающие реализацию систем менеджмента качества интегрированных с менеджментом конфигурации, менеджментом измерений, менеджментом риска, менеджментом инноваций и менеджментом знаний в конечном итоге [4].

Композиционные материалы как одни из основных лидирующих продуктовых инноваций требуют соответствующего уровня управления качеством, когда мы говорим о композитах как о самостоятельной отрасли, которая не сможет развиваться без соответствующего уровня организации и реализации испытаний.

#### Литература:

1. Федотов Л.В., Оленев А.А., Гусев А.И. Статистический анализ качества на основе парной корреляции показателей деятельности предприятия. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т.19. – №1(2). – С.147–150.
2. Бондалетова Л.И. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118.
3. Федотов Л.В., Дятлов А.Ю., Ермоленко М.А. Интегрированная система управления качеством для обеспечения поддержки жизненного цикла изделий авиационной техники на основе менеджмента конфигурации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(2). – С. 527–529.
4. Краснов С.И., Федотов Л.В. Концепции и принципы системы менеджмента знаний для обеспечения поддержки жизненного цикла изделий авиационной техники // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(2). – С. 363–367.

УДК 665.044.7, 691.175.5/.8

## **Современные щелочестойкие эпоксидные составы и композиты на их основе для применения в строительной области**

Астахов П.А.<sup>1</sup>; Шаронов А.В.<sup>1</sup>

[splast@list.ru](mailto:splast@list.ru)

<sup>1</sup>ООО «Суперпласт», г. Москва

### ***Аннотация:***

*Представлены результаты работы по разработке эпоксидных связующих (матриц) с высокой щелочестойкостью. Приведены результаты испытаний эпоксидбазальтопластиков на щелочестойкость по различным методикам. Выбраны оптимальные связующие с точки зрения щелочестойкости и технологичности, которые обеспечивают долговечность работы армирующих композитных изделий в бетонных конструкциях.*

### ***Ключевые слова:***

*эпоксидное связующее (матрица), эпоксидная смола, отвердитель, композитный материал, щелочестойкость.*

### **Введение**

Всем хорошо известны разработанные в ФГУП «ВИАМ» и широко используемые эпоксидные связующие марок ЭДТ-10 и ЭДТ-10П. Данные матрицы на протяжении долгих лет успешно применяются в составе стекло-, угле-, органопластиков для авиационной и ракетно-космической техники. Перечисленные связующие представляют собой двухупаковочные составы,

состоящие из модифицированных эпоксидной смолы и аминных отвердителей. Трансфер данных связующих в гражданскую отрасль по сути уже состоялся. Состав ЭДТ-10 успешно применяется при намотке химстойких стеклопластиковых труб. Но основным «драйвером» развития отрасли композитных материалов считается строительный сектор, где связующие данного типа используются в основном в материалах строительной химии и крайне редко в составе композитных материалов.

В настоящее время в строительной отрасли для изготовления композитных армирующих элементов (арматура, гибкие связи, сетки и др.) методом безфильтровой протяжки используется, в большинстве случаев, один тип связующего в различных модификациях – это эпоксидная смола ЭД-20 (или модифицированная эпоксидная смола КДА), отвердитель – изометилтетрагидрофталевый ангидрид (ИзоМТГФА) и ускоритель – 2,4,6 Трис (диметил-аминометил) фенол (УП-606/2).

Данная система весьма технологична (имеет низкую вязкость, малое время гелеобразования (не более 1 минута при 190°C), длительную жизнеспособность (более 6 часов)). Благодаря существующим показателям данная матрица находит широкое применение при изготовлении полимерных композиционных изделий перечисленными способами. Существенным недостатком данного связующего и других эпоксидных систем с ангидридными отвердителями является то, что при отверждении образуется сложноэфирная связь, неустойчивая к воде и щелочам. В результате изделия имеют низкие характеристики по водо- и щелочестойкости, что недопустимо при применении изделий в щелочной среде бетона, которая является основной областью использования композитных армирующих изделий.

Решением данной проблемы является применение при производстве изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) аминных типов отвердителей, взамен ангидридного - ИзоМТГФА.

Новые типы связующих должны обладать аналогичными технологическими характеристиками (низкая вязкость, хорошая смачиваемость, длительная жизнеспособность, высокая скорость отверждения при повышенных температурах), которые имеют традиционно используемые эпоксиангидридные связующие:

- Динамическая вязкость – не более 1000 МПа·с (при 25°C);
- Время желатинизации при температуре 180°C – не более 1 мин;
- Жизнеспособность при температуре при 20°C – не менее 6 часов.

### **Основная часть**

Как отмечалось ранее применение аминных связующих в пултрузионных технологиях крайне редко. Причиной этого является короткое «время жизни» данных систем, а также присутствие экзотермических эффектов в больших и малых объемах.

Вариантом решения данной проблемы является использование технологии инъекционной пултрузии с применением камеры пропитки и дозаторов-смесителей, которые обеспечивают равномерное смешение и подачу связующего в зону пропитки. Но стоимость данного оборудования, хорошего качества, высока и не всегда оправданна, так как строительная индустрия устанавливает жесткие ценовые лимиты на используемые композитные материалы и изделия, сравнивая их со стальными, что не совсем корректно.

Разработка эпоксиаминной системы с продолжительным временем жизни и высокой скоростью отверждения позволит использовать стандартное оборудование без дополнительных затрат на модернизацию и переоснащение при смене связующего.

Требования безопасности и долговечности строительных объектов, являются первоочередными и определяют требования к материалам, применяемым в строительстве.

Долговечность композитных армирующих материалов и изделий в среде бетона обеспечивается их высокой щелочестойкостью, причем данные изделия должны сохранять не только целостность формы и массы, но и прочностные характеристики.

Прочность в композитах обеспечивает армирующий наполнитель, связующее придает композиционному материалу монолитность, способствует равномерному распределению нагрузки между волокнами, защищает их от химических, атмосферных и других внешних воздействий и само воспринимает часть усилий, развивающихся в материале при работе под нагрузкой [1]. Т.е. основным элементом, определяющим щелочестойкость изделия является связующее.

Работа по созданию связующих была начата с подбора и модификации эпоксидных смол и аминных отвердителей с продолжительной жизнеспособностью.

Для проведения исследований технологических характеристики были выбраны три типа связующих с аминными отвердителями (№1, №2 и №3) и, для сравнения, стандартная рецептура ангидридного связующего: смола КДА – 100 масс.ч, ИзоМТГФА – 92 масс.ч, УП 606/2 – 1,5 масс.ч.

Характеристики разработанных матриц представлены в таблице 1:



Таблица 1

№ п\п	Наименование показателя	Связующее №1	Связующее №2	Связующее №3	КДА+ ИзоМТГФА+ УП 606/2
1	Тип отвердителя	аминный	аминный	аминный	ангидридный
2	Динамическая вязкость при 25°C, мПа·с	1400	500	800	300
3	Время желатинизации при температуре 180°C, сек.	25	20	22	45
4	Жизнеспособность при температуре при 20°C, час	2,0	7,5	6,0	8,0
5	Соотношение смола: отвердитель, масс.ч.	100:28	100:60	100:32	100:90

Из таблицы 1 видно, что помимо используемой ангидридной системы, наиболее подходящие связующие по вязкости и жизнеспособности для изготовления композитных строительных изделий методом протяжки – это матрицы №2 и №3.

С использованием выбранных систем были изготовлены образцы композитных армирующих изделий методом безфильтровой протяжки в виде композитной фибры.

В качестве армирующего наполнителя была выбрана базальтовая нить на основе базальтового ровинга торговой марки «MAFIC».

На опытной установке было наработано по 1 кг композитной фибры диаметром 0,7 мм для изготовления образцов и определения их химстойкости по различным методикам (АСИ 440.3R-04 и ГОСТ 12020).

Образцы нарабатывались при средней скорости протяжки 5 м/мин.

Результаты испытаний образцов на химстойкость в щелочи, кислоте и воде по ГОСТ 12020 представлены в таблицах 2–4.

Таблица 2

№ п/п	Наименование связующего	Потеря массы %, кипячение в течение 1 часа в водном растворе 10% NaOH	Изменение внешнего вида
1	№2	1,7	Незначительные изменения, основная часть образца сохранила структуру
2	№3	1,4	Незначительные изменения, основная часть образца сохранила структуру
3	КДА+ ИзоМТГФА+ УП 606/2	25,9	Значительные изменения, связующее разрушено, образец утратил свою структуру.

Таблица 3

№ п/п	Наименование связующего	Потеря массы %, кипячение в течение 1 часа в растворе соляной кислоты 2М HCl	Изменение внешнего вида
1	№2	0,7	Незначительные изменения, основная часть образца сохранила структуру
2	№3	0,6	Незначительные изменения, основная часть образца сохранила структуру
3	КДА+ ИзоМТГФА+ УП 606/2	0,4	Незначительные изменения, основная часть образца сохранила структуру

Таблица 4

№ п/п	Наименование связующего	Потеря массы %, кипячение в течение 1 часа в воде H <sub>2</sub> O	Изменение внешнего вида
1	№2	0,6	Без изменений, образец сохранил первоначальную структуру
2	№3	0,6	Без изменений, образец сохранил первоначальную структуру
3	КДА+ ИзоМТГФА+ УП 606/2	1,1	Незначительные изменения, основная часть образца сохранила структуру

Результаты испытаний по ГОСТ 12020 (по потере массы) показали, что эпоксидное связующее с ангидридным отвердителем не обладает стойкостью к щелочам и не рекомендуется к использованию в среде бетона. Связующее №2 и №3 с аминным отвердителем обладает лучшей стойкостью к щелочам и воде в сравнении с ангидридной матрицей, но имеет ниже стойкость к соляной кислоте.

Для проверки полученных выводов и оценки потери механических свойств под действием щелочной среды были проведены исследования по стандарту ACI 440.3R-04, наиболее востребованному в мире документу для оценки качества армирующих композитных изделий при их использовании для армирования бетонных конструкций.

Согласно ACI 440.3R-04 был приготовлен состав щелочного раствора следующей рецептуры: 118,5 г Са (ОН)<sub>2</sub>, 0,9 г NaOH и 4,2 г KOH в 1 л дистиллированной воды [2].

Водородный показатель полученного раствора pH13.

Температура раствора 60°C.

Время выдержки 1 и 2 недели.

По требованию сертифицирующего органа сохранение разрывного усилия изделия в виде композитной фибры должно составлять не менее 80% после выдержки в течение двух недель в описанном выше щелочном растворе.

Испытания на разрыв проводились на испытательной машине Zwick/Roell Z010 при следующих условиях:

- Датчик силы : 10 кН
- Скорость испытания : 100 мм/мин
- Расчетная длина : 150,00 мм
- Условия испытания : 23°C, влажность 35%.

Результаты испытаний образцов на щелочестойкость по стандарту АСІ 440.3R-04 представлены в таблице 5.

Таблица 5

Состав образца	Разрывная нагрузка, Н				
	до	после выдержки в щелочном растворе (1 неделя)	Сохранение свойств, %	после выдержки в щелочном растворе (2 недели)	Сохранение свойств, %
Базальтовая нить + КДА+ ИзоМТГФА+ УП 606/2	287,4	85,5	30	25,55	9
Базальтовая нить + связующее №2	267	230	86	215,5	81
Базальтовая нить + связующее №3	244	198	81	138	57

На основании полученных данных оптимальным связующим с точки зрения сохранения свойств материала в щелочной среде является связующее №2.

Связующее №2 имеет хорошие технологические характеристики, позволяющие получать качественные армирующие изделия с высокой производительностью:

- Динамическая вязкость – 500 МПа·с (при 25°C);
- Время желатинизации при температуре 180°C – 20 секунд;
- Жизнеспособность при температуре при 20°C – более 7,5 часов.

Традиционно используемое эпоксигридное связующее с отвердителем ИзоМТГФА имеет низкую щелочестойкость и не рекомендуется к применению в среде бетона. Данные выводы подтверждены результатами по оценке прочностных характеристик при воздействии щелочной среды – таблица 5.

#### **Выводы:**

1. На основании проведенных исследований разработано эпоксидное связующее №2 с аминным отвердителем, удовлетворяющее требованиям по сохранению механических свойств после выдержки в щелочной среде.

2. Разработка связующего №2 позволила решить проблемы применения эпоксидных связующих с аминными отвердителями в пултрузионных технологиях за счет обеспечения времени жизнеспособности более 7,5 часов.

#### Литература

1. В.А. Калинин, М.С. Макаров. Намотанные стеклопластики.: В.А. Калинин, М.С. Макаров. - М.: Химия/ 1986. – 272 с., ил.

2. ACI Committee 440, 2004, “Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures (ACI 440.3R-04) American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 40 pp.

**Системные требования:** Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/Vista/7; Adobe Reader; дисковод CD-ROM; 10 Мб; Загл. с экрана.

**Использованное программное обеспечение:** Microsoft Office Word 2010

*Статьи представлены в авторской редакции*

За содержание статей, точность приведенных фактов и цитирование  
несут ответственность авторы публикаций

**Объем издания:** 10 Мб.

Тираж 100 экз.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,  
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»  
ГНЦ РФ)

Изд-во ФГУП «ВИАМ»

admin@viam.ru



МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ  
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО НАДЗОРУ  
В СФЕРЕ СВЯЗИ, ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ

ФГУП НТЦ "ИНФОРМРЕГИСТР"

**РЕГИСТРАЦИОННОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
обязательного федерального экземпляра  
электронного издания

№ 55592

Электронное издание на 1 CD-R  
«Полимерные композиционные материалы нового поколения. Трансфер инноваций из авиации в приоритетные сектора экономики России: всероссийская научно-техническая конференция, г. Ульяновск, 17 августа 2018 г.: материалы конференции: электронное издание. Москва, 2018. ISBN 978-5-905217-27-2»  
(© 2018 ФГУП "ВИАМ").

Номер государственной регистрации обязательного экземпляра электронного издания – 0321803183.

Производитель: ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов".

И. о. директора ФГУП НТЦ "Информрегистр"

Т.В. Плескачева



26 сентября 2018 г.