

УДК 678.8

*А.А. Баранников<sup>1</sup>, М.В. Постнова<sup>1</sup>, Е.В. Крашенинникова<sup>1</sup>, А.Н. Васюков<sup>1</sup>***ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ  
ЛОПАСТЕЙ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-91-102

*Рассмотрено применение обработки плазмой атмосферного давления (ПАД) в качестве способа подготовки поверхности стеклопластика марки ВПС-53К при изготовлении лопасти несущего винта вертолета семейства «Ми». Установлено, что обработка ПАД увеличивает прочность клеевого соединения «лонжерон–обшивка» (стеклопластик марки ВПС-53К), а также наблюдается снижение прочности соединения при наличии временного разрыва (1 мес) между обработкой обшивки ПАД и операцией склеивания, что требует проведения дополнительных исследований.*

**Ключевые слова:** *стеклопластик, органопластик, сопротивление отслаиванию, лопасть несущего винта вертолета, клеевое соединение, плазма атмосферного давления.*

*A.A. Barannikov<sup>1</sup>, M.V. Postnova<sup>1</sup>, E.V. Krashenninnikova<sup>1</sup>, A.N. Vasyukov<sup>1</sup>***APPLICATION OF NEW TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION  
OF HELICOPTER MAIN ROTOR BLADES**

*The paper considers the use of atmospheric pressure plasma (APP) treatment as a method for surface preparation of fiberglass of the VPS-53K brand in the manufacture of the main rotor blades of a helicopter of the «Mi» family. It was found that APP treatment increases the strength of the «spar–sheathing» adhesive bond (fiberglass grade VPS-53K), and also that there is a decrease in the bond strength in the presence of a temporary gap (one month) between the processing of the APP sheathing and the gluing operation, which requires additional research.*

**Keywords:** *fiberglass, kevlar, flaking resistance, helicopter main rotor blade, adhesive joint, atmospheric pressure plasma.*

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Основным преимуществом новейших образцов авиационной техники (АТ) по сравнению с предшественниками является применение при их создании современных материалов и технологий. Это напрямую связано с использованием полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкции АТ, позволяющих создавать крупногабаритные детали с большой степенью интегральности и высокой весовой эффективностью, что достигается уникальными свойствами этого класса материалов. Особенностью изготовления конструкций из ПКМ, в отличие от металлов, является реализация принципа «материал–технология–конструкция», когда каждое из звеньев данной цепочки должно обеспечивать надежную работу при создании деталей АТ. Применение ПКМ нового поколения, разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, и технологии их переработки обеспечивает высокий уровень эксплуатационных свойств. Однако еще не в полной мере реализованы принципы интегральности авиационных

конструкций, и на пути к их достижению возникают задачи по локальному соединению отдельных элементов в единую конструкцию. Для ПКМ соединение выполняется в основном путем склеивания элементов между собой, что создает дополнительные сложности при изготовлении конструкций.

В настоящее время доля ПКМ в конструкции вертолетной техники неуклонно растет и может достигать 50 %, разработчики стремятся ее увеличить [1].

В течение многих лет АО «Московский вертолетный завод имени М.Л. Миля» (АО «МВЗ им. М.Л. Миля», сейчас – АО «Национальный центр вертолетостроения имени М.Л. Миля и Н.И. Камова» холдинга АО «Вертолеты России») тесно сотрудничает с НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ по разработке и применению полимерных композиционных и функциональных материалов в конструкциях вертолетной техники. Примером плодотворного сотрудничества между АО «МВЗ им. М.Л. Миля», НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и ПАО «Роствертол» является разработка линейки перспективных материалов для одного из основных и особо ответственных агрегатов вертолета – лопасти несущего винта (ЛНВ). Разработаны стеклопластики и гибридные стеклоуглепластики для изготовления лонжеронов, а также листовые органические пластики, используемые в качестве обшивок хвостовых отсеков (ХО) с сотовым наполнителем [2–7].

Компания «Роствертол» выпускает ЛНВ для вертолетной техники семейства «Ми», в которых применена конструктивно-силовая схема с разрезным ХО (рис. 1).

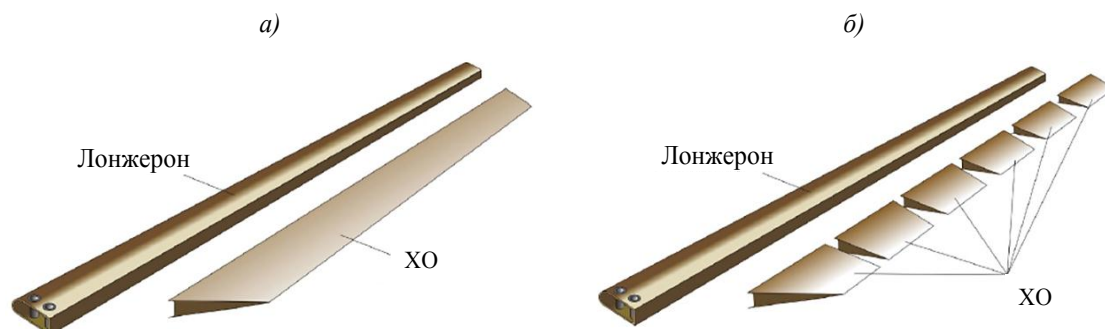


Рис. 1. Конструктивно-силовая схема с одним сплошным (а) и с несколькими отдельными разрезными хвостовыми отсеками (ХО) (б)

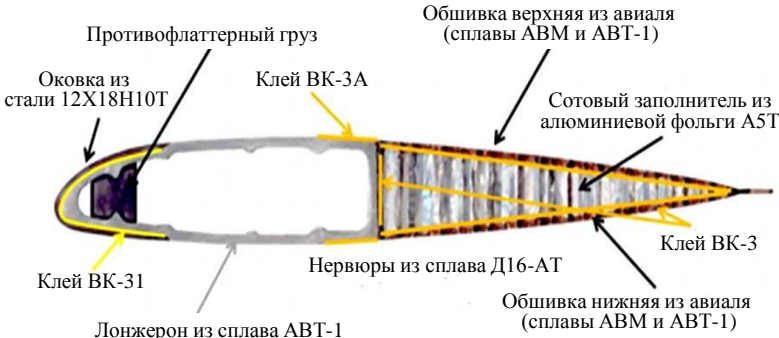
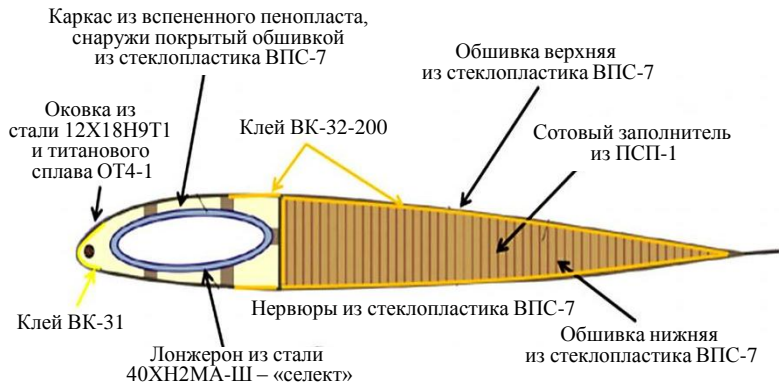
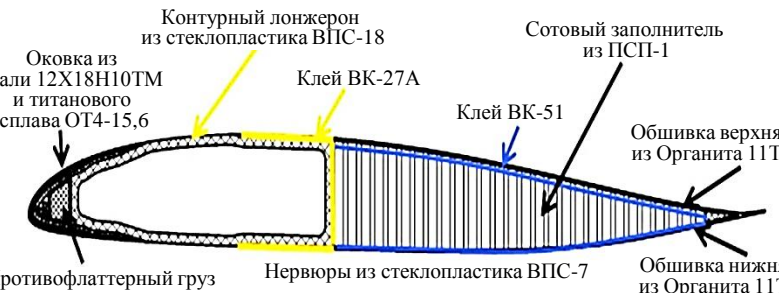
Данная схема используется с 1950-х гг. и обеспечивает заданные жесткостные, резонансные, упруго-массовые характеристики, качество и надежность ЛНВ. Хвостовой отсек, являющийся частью аэродинамической поверхности, участвует в создании подъемной силы и передает перерезывающую силу на лонжерон. Наличие отдельных ХО на лопасти позволяет уменьшить напряжения в обшивке, а также упростить замену при повреждении и ремонте ХО.

Лопasti несущего винта можно систематизировать по виду используемых материалов в основных элементах конструкции [8–14]. Различают три основных типа ЛНВ (табл. 1).

Опыт эксплуатации указанных типов ЛНВ показывает, что цельнокомпозитные лопасти обладают значительно большей усталостной долговечностью, боевой «живучестью» и стойкостью к внешним воздействиям, их ресурс во много раз больше, чем у цельнометаллических лопастей [12, 15]. Однако по сравнению с явными достоинствами существуют и недостатки цельнокомпозитной лопасти, основным из которых является низкая экономическая эффективность из-за высокой себестоимости, обусловленной стоимостью ПКМ.

Таблица 1

## Эволюция конструкций лопасти несущего винта (ЛНВ)

Тип ЛНВ	Поперечное сечение лопасти
Цельнометаллическая	 <p>Противовлаптерный груз</p> <p>Оковка из стали 12Х18Н10Т</p> <p>Клей ВК-3А</p> <p>Обшивка верхняя из авиала (сплавы АВМ и АВТ-1)</p> <p>Сотовый наполнитель из алюминиевой фольги А5Т</p> <p>Клей ВК-3</p> <p>Обшивка нижняя из авиала (сплавы АВМ и АВТ-1)</p> <p>Нервюры из сплава Д16-АТ</p> <p>Лонжерон из сплава АВТ-1</p> <p>Клей ВК-31</p>
Смешанная	 <p>Каркас из вспененного пенопласта, снаружи покрытый обшивкой из стеклопластика ВПС-7</p> <p>Обшивка верхняя из стеклопластика ВПС-7</p> <p>Сотовый наполнитель из ПСП-1</p> <p>Обшивка нижняя из стеклопластика ВПС-7</p> <p>Нервюры из стеклопластика ВПС-7</p> <p>Лонжерон из стали 40ХН2МА-Ш – «селект»</p> <p>Оковка из стали 12Х18Н9Т1 и титанового сплава ОТ4-1</p> <p>Клей ВК-31</p> <p>Клей ВК-32-200</p>
Цельнокомпозитная	 <p>Контурный лонжерон из стеклопластика ВПС-18</p> <p>Сотовый наполнитель из ПСП-1</p> <p>Обшивка верхняя из Органита 11ТЛ</p> <p>Обшивка нижняя из Органита 11ТЛ</p> <p>Нервюры из стеклопластика ВПС-7</p> <p>Клей ВК-51</p> <p>Оковка из стали 12Х18Н10ТМ и титанового сплава ОТ4-15,6</p> <p>Клей ВК-27А</p> <p>Противовлаптерный груз</p>

В настоящее время ведущие отечественные и мировые разработчики ПКМ проводят исследования, направленные на создание новейших материалов и технологий, позволяющих повысить эксплуатационную эффективность при изготовлении изделий из данных материалов [6]. В процессе эксплуатации такой ЛНВ в условиях повышенной влажности морского климата выявлены отдельные факты появления «волн» по кромке ХО в районе соединения «обшивка из органопластика Органит 11ТЛ–нервюра», что может привести к снижению эксплуатационной надежности несущего винта.

В этой связи разработан и запущен в серийное производство стеклопластик марки ВПС-53К (рис. 2, б), который, по сравнению с органопластиком, имеет меньшую (на 20 %) стоимость и обладает более высокими эксплуатационными характеристиками – повышенными значениями сопротивления усталости и климатической стойкости [4, 16–20].

При освоении производства ХО с обшивками из стеклопластика марки ВПС-53К в процессе изготовления ЛНВ вертолета семейства «Ми» установлено снижение прочности клеевого соединения «лонжерон–обшивка» (рис. 3) по сравнению с прочностью

обшивок из органопластика Органит 11ТЛ. В обоих случаях в качестве адгезива применяли клей ВК-27А.

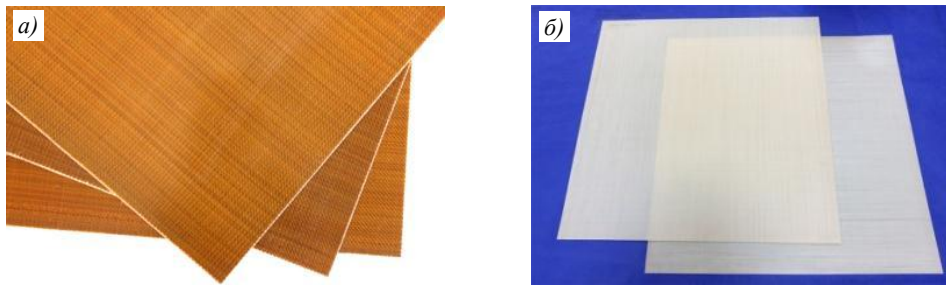


Рис. 2. Общий вид обшивок из органопластика Органит 11ТЛ (а) и стеклопластика марки ВПС-53К (б)

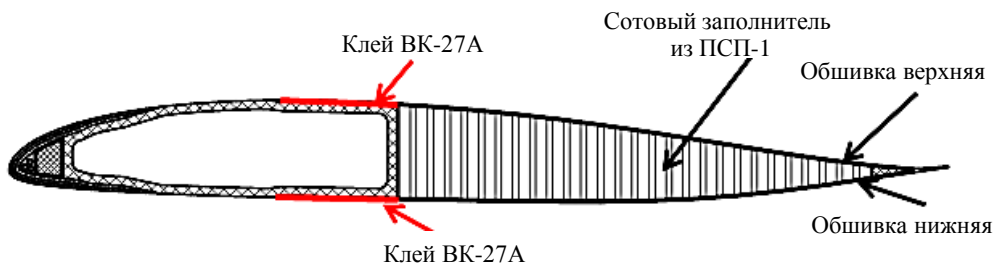


Рис. 3. Зона клеевого соединения «лонжерон–обшивка» лопасти несущего винта вертолета семейства «Ми»

Результаты механических испытаний – отрыв обшивки ХО с технологического лонжерона с измерением усилия отрыва, проведенные в условиях ПАО «Роствертол», показали, что значения усилия отрыва не соответствуют требованиям нормативной документации (НД). В табл. 2 приведены результаты отрыва обшивки ХО.

Таблица 2

**Результаты механических испытаний в условиях ПАО «Роствертол» по определению усилия отрыва обшивки хвостового отсека (ХО) с технологического лонжерона**

Условный номер образца	Расположение обшивки ХО	Значения усилия отрыва, кгс (Н/мм)	
		по НД (не менее)	фактические**
1	Верхняя	40,00 (1,00)*	<u>26,00 (0,63)*–30,00 (0,73)*</u> 27,56 (0,67)*
	Нижняя		<u>20,00 (0,49)*–26,00 (0,63)*</u> 23,56 (0,57)*
2	Верхняя		<u>26,00 (0,63)*–28,00 (0,69)*</u> 28,44 (0,69)*
	Нижняя		<u>20,00 (0,49)*–26,00 (0,63)*</u> 23,56 (0,57)*

\* Значение, полученное путем перерасчета.  
\*\* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Специалистами НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на основании полученных результатов испытаний, проведенных в ПАО «Роствертол», осуществлены механические испытания по определению сопротивления отслаиванию клеевого соединения «обшивка–лонжерон» методом плавающего ролика (в соответствии с ГОСТ Р 57832–2017). Данный метод заключается в измерении силы, необходимой для отслаивания гибкой

подложки от жесткого основания при заданном угле отрыва. В качестве гибкой подложки использовали стеклопластик марки ВПС-53К (обшивка), а в качестве жесткого основания – материал одной химической природы с материалом лонжерона ЛНВ.

Результаты механических испытаний, проведенных в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ», по определению сопротивления отслаиванию клеевого соединения «обшивка–лонжерон» (в Н/мм) с использованием клея ВК-27А (в числителе даны минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее):

	Значение по НД	Фактические значения
Сопротивление отслаиванию клеевого соединения «обшивка–лонжерон»	1,00	$\frac{0,45-0,70}{0,60}$

Из полученных результатов видно, что прочность клеевого соединения «обшивка–лонжерон» не соответствует требуемым по НД значениям.

Параллельно проведены исследования влияния способа подготовки поверхности стеклопластика марки ВПС-53К на повышение прочности клеевого соединения, выполненного с использованием клея холодного отверждения ВК-27А без армирования нетканым термоскрепленным полотном, а также на изменение свойств поверхностного слоя обработанного материала. Результаты проведенных исследований представлены в работах [21–23]. Кроме того, сделаны следующие основные выводы:

– стеклопластик марки ВПС-53К имеет низкие адгезионные свойства при склеивании клеем холодного отверждения ВК-27А;

– способ подготовки поверхности – зашкуривание, применяемый в действующем технологическом процессе, не обеспечивает требуемое значение прочности клеевого соединения «обшивка–лонжерон»;

– способ подготовки поверхности – обработка плазмой атмосферного давления (ПАД), является одним из перспективных способов подготовки поверхности ПКМ под склеивание, который обеспечивает требуемое значение прочности клеевого соединения «обшивка–лонжерон» в течение длительного времени после обработки ПАД поверхности обшивки [24–40].

Цель данной работы – отработка технологии подготовки поверхности листового стеклопластика марки ВПС-53К с использованием обработки ПАД через операцию склеивания «лонжерон–обшивка» при изготовлении ЛНВ.

### Материалы и методы

Для достижения поставленной цели сформированы следующие задачи:

– обработка поверхности листового стеклопластика марки ВПС-53К (далее – обшивка) ПАД;

– исследование влияния обработки ПАД на прочность клеевого соединения «лонжерон–обшивка»;

– исследование влияния временного разрыва между обработкой поверхности обшивки ПАД и операцией склеивания.

Первоначально в производственных условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведена работа по обработке обшивок ПАД (рис. 4).

Обшивка представляет собой лист габаритным размером 450×450 мм и толщиной  $0,35 \pm 0,05$  мм. Обработку обшивок проводили с помощью генератора ПАД [21].

Для исключения влияния ПАД на основные показатели требований ТУ 1-595-25-1496–2015 несколько обработанных листов переданы на исследование по определению массы, толщины и предела прочности при растяжении в направлении  $[0^\circ]$  и  $[90^\circ]$  до и после обработки ПАД в соответствии с ГОСТ 25.601–83.



Рис. 4. Обработка обшивок с помощью генератора плазмы атмосферного давления

Параллельно обработанные ПАД обшивки раскраивали на заготовки образцов (размером 300×150 мм) и склеивали с жестким основанием (размером 150×150×2 мм) с использованием клея ВК-27А без армирования нетканым термоскрепленным полотном. В целях изучения влияния удельного давления прессования на прочность клеевого соединения и проверки параметров действующего технологического процесса склеивание проводили в прессе при удельном давлении 1 и 2 кН/м<sup>2</sup> и температуре 60±5 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением под давлением до температуры не более 40 °С. В качестве жесткого основания использовали материал одной химической природы с материалом лонжерона ЛНВ. Микрорельеф поверхности жесткого основания сформирован в результате снятия «жертвенного» слоя – ткани технической разделительной «Р-ТЕКС» марки Р85ПА (в соответствии с ТУ 8388-010-30189225–2015).

Из склеенных заготовок на станке гидроабразивной резки вырезали образцы шириной 25±0,5 мм для определения прочности клеевого соединения. Прочность клеевого соединения определяли методом сопротивления отслаиванию клеевых соединений по ГОСТ Р 57832–2017 на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z050.

Одновременно с изготовлением образцов произведена постановка обшивок, обработанных ПАД, на хранение в условиях категории 1 размещения изделий (в соответствии с ГОСТ 15150–69) сроком на 1 мес с последующими изготовлением из них образцов и их механическими испытаниями.

После обработки поверхности обшивки ПАД листы стеклопластика марки ВПС-53К переданы ПАО «Роствертол», в производственных условиях которого в соответствии с действующим технологическим процессом, за исключением операции зашкуривания, изготовлены ХО (рис. 5, а) и приклеены к технологическому лонжерону (рис. 5, б) для проведения механических испытаний на соответствие требованиям НД.

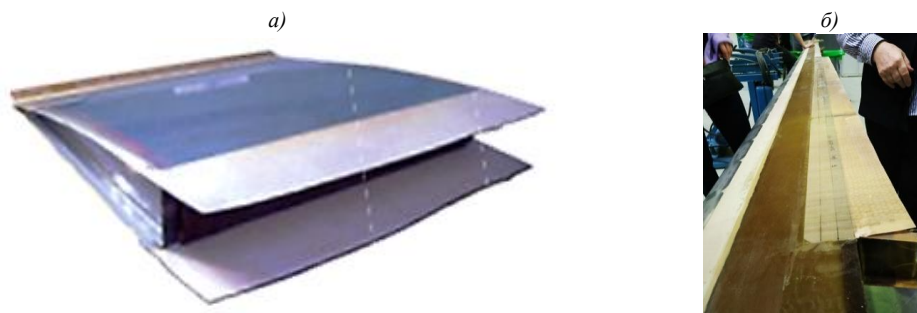


Рис. 5. Вид изготовленного хвостового отсека (ХО) (а), а также приклеенных к технологическому лонжерону и подготовленных к механическим испытаниям ХО (б)

### Результаты и обсуждение

Результаты исследования влияния обработки ПАД на основные свойства стеклопластика марки ВПС-53К (в соответствии с требованиями ТУ 1-595-25-1496–2015), представленные в табл. 3, показали, что обработка ПАД не оказывает отрицательного воздействия на данный стеклопластик и все показатели обшивки соответствуют требованиям НД.

Таблица 3

#### Результаты исследования влияния обработки плазмой атмосферного давления на основные свойства обшивки из стеклопластика марки ВПС-53К

Свойства	Значения свойств обшивки		
	по НД	фактические*	
		до обработки	после обработки
Толщина, мм	0,35±0,05	0,32	0,31
Масса образца размером 430×430 мм, г	97–107	105	104
Предел прочности при растяжении, МПа, в направлении:	Не менее 720	<u>905–1005</u>	<u>840–1035</u>
		940	955
[0°]	Не менее 380	<u>415–445</u>	<u>395–475</u>
[90°]		425	425

\* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

По окончании механических испытаний образцов, склеенных с использованием клея ВК-27А без армирования нетканым термоскрепленным полотном под разным удельным давлением прессования, получены результаты, представленные в табл. 4 и на рис. 6. Характер разрушения оценивали в соответствии с ГОСТ Р 56977–2016.

Таблица 4

#### Результаты исследования влияния удельного давления прессования на прочность клеевого соединения «обшивка–жесткое основание»

Условие испытания и характер разрушения		Значения сопротивления отслаиванию, Н/мм		
		по НД	фактические*	
			без обработки ПАД	после обработки ПАД
Удельное давление прессования, кН/м <sup>2</sup>	1	1,00	<u>0,06–0,09</u> 0,06	<u>1,80–2,80</u> 2,50
	2		<u>0,04–0,06</u> 0,05	<u>2,00–2,50</u> 2,40
Характер разрушения **			ADH	LFT

\* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

\*\* ADH – адгезионное разрушение, LFT – разрушение из-за слабого разрыва волокон.

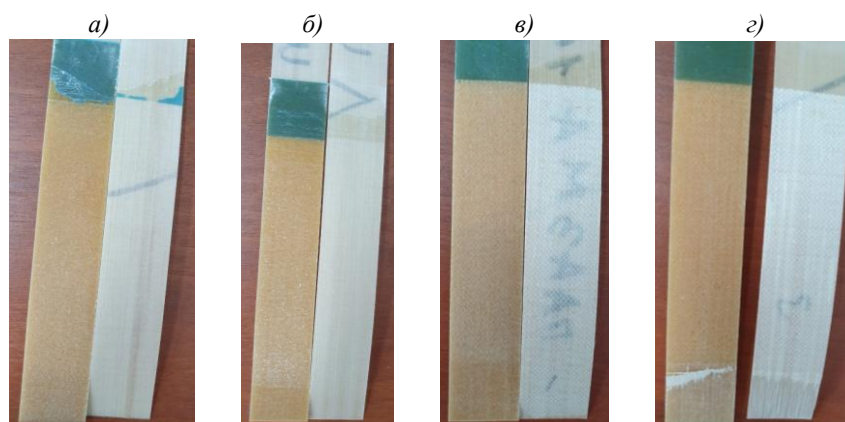


Рис. 6. Виды образцов без обработки (а, б) и с обработкой ПАД (в, з) после механических испытаний при удельном давлении склеивания 1 (а, в) и 2 кН/м<sup>2</sup> (б, з)

Результаты испытаний и визуализированного анализа свидетельствуют, что удельное давление прессования незначительно влияет на прочность клеевого соединения и характер его разрушения. Это также подтверждается значениями толщины клеевого шва, полученными в ходе исследования микроструктуры клеевого соединения «гибкая подложка–жесткое основание». Толщина клеевого шва при удельном давлении 1 кН/м<sup>2</sup> (среднее значение из 10 измерений) составила 110 мкм, а при удельном давлении 2 кН/м<sup>2</sup>: 104 мкм. Таким образом, можно сделать вывод, что удельное давление склеивания, используемое в действующем технологическом процессе, не оказывает существенного влияния на прочность клеевого соединения.

Дальнейший процесс склеивания контрольных образцов проводили с использованием клея ВК-27А без армирования нетканым термоскрепленным полотном при удельном давлении 1 кН/м<sup>2</sup>. После проведения механических испытаний контрольных образцов, изготовленных в производственных условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, в день обработки и спустя 1 мес хранения получены результаты, представленные в табл. 5 и на рис. 7.

Таблица 5

**Результаты механических испытаний в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ по определению сопротивления отслаиванию клеевого соединения «обшивки–жесткое основание»**

Значения сопротивления отслаиванию, кгс (Н/мм)			
по НД	фактические**		
	без обработки ПАД	после обработки ПАД	спустя 1 мес после обработки ПАД
40 (1,00)*	$\frac{1,60 (0,04)^* - 2,40}{(0,06)^*}$ 2,00 (0,05)*	$\frac{64,00 (1,60)^* - 80,00}{(2,00)^*}$ 72,00 (1,80)*	$\frac{60,00 (1,50)^* - 68,00}{(1,70)^*}$ 64,00 (1,60)*
Характер разрушения***	ADH	LFT	

\* Значение, полученное путем перерасчета.  
 \*\* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.  
 \*\*\* ADH – адгезионное разрушение, LFT – разрушение из-за слабого разрыва волокон.

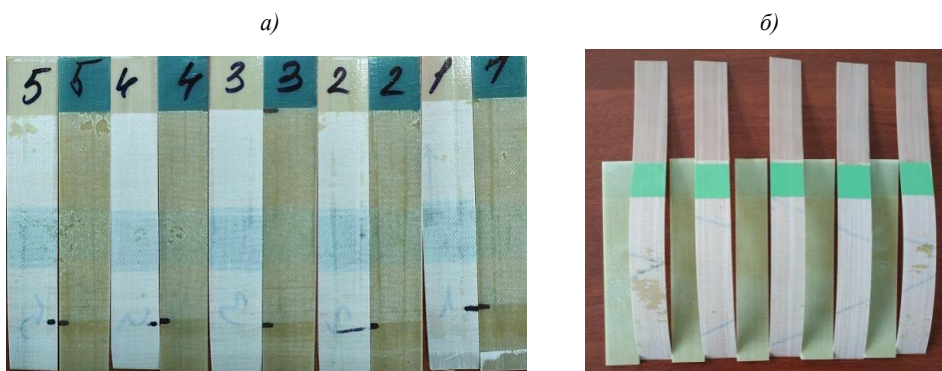


Рис. 7. Вид образцов после механических испытаний в день обработки (а) и спустя 1 мес хранения (б)

Механические испытания в ПАО «Роствертол» проводили по методике, отличной от методики, представленной в ГОСТ Р 57832–2017, по НД на ЛНВ вертолета семейства «Ми». Методика механического натурального испытания заключается в срыве обшивки ХО с технологического лонжерона с измерением усилия отрыва (рис. 8).

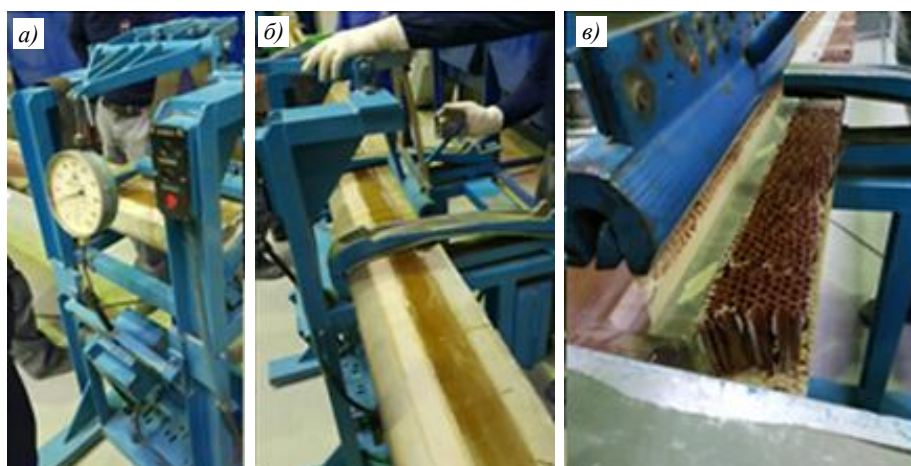


Рис. 8. Общий вид установки (а) для испытания на срыв обшивки ХО с технологического лонжерона с измерением усилия отрыва, а также зона крепления технологического лонжерона в приспособление (б) и процесс срыва обшивки (в)

Результаты механических испытаний, проведенных в производственных условиях ПАО «Роствертол», представлены в табл. 6 и на рис. 9. Характер разрушения – преимущественно LFT с различным процентным соотношением от 10–20 % FT (разрушение из-за разрыва волокон).

Таблица 6

**Результаты механических испытаний в условиях ПАО «Роствертол» по определению усилия отрыва\* обшивки хвостового отсека (ХО) с технологического лонжерона**

Расположение обшивки ХО	Значения усилия отрыва, кгс (Н/мм)		
	по НД (не менее)	фактические**	
		после обработки ПАД	спустя 1 мес после обработки ПАД
Верхнее	40 (1,00)	<u>75,00 (1,83)*–83,00 (2,00)*</u> 79,80 (1,95)*	<u>58,00 (1,42)*–72,00 (1,76)*</u> 64,00 (1,56)*
Нижнее		<u>53,00 (1,30)*–78,00 (1,90)*</u> 67,40 (1,65)*	<u>55,00 (1,35)*–73,00 (1,79)*</u> 62,20 (1,52)*

\* Значение, полученное путем перерасчета.  
\*\* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

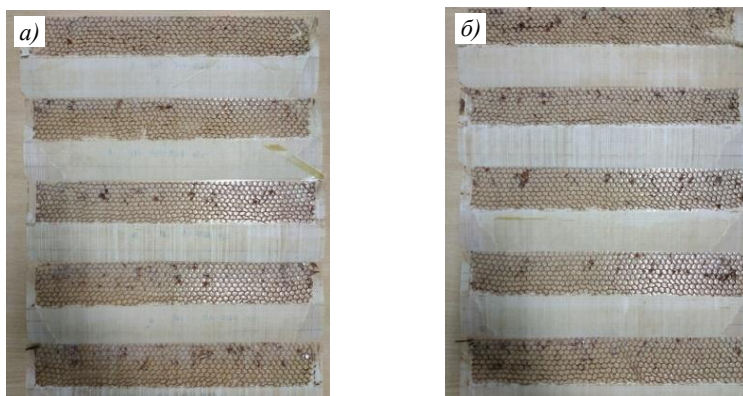


Рис. 9. Вид обшивок после механических испытаний после обработки ПАД (а) и спустя 1 мес после обработки ПАД (б)

Таким образом, результаты, полученные после испытаний, свидетельствуют, что обработка обшивок ПАД положительно сказывается на повышении прочности клеевого соединения «лонжерон–обшивка», значение которой в 1,8 раза больше у образцов, изготовленных в день обработки поверхности обшивки ПАД, и в 1,6 раза больше спустя 1 мес хранения обшивки в условиях категории 1 размещения изделий (в соответствии с ГОСТ 15150–69) в сравнении с требованиями НД. В сравнении с исходными обшивками (необработанными ПАД) прочность клеевого соединения возросла в 36 и 32 раза. Характер разрушения образцов после механических испытаний – LFT (рис. 6).

Результаты прочности клеевого соединения, полученные в производственных условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, коррелируют с результатами, полученными в производственных условиях ПАО «Роствертол». Установлено, что значения прочности клеевого соединения увеличились по отношению к результатам, представленным в табл. 2 для верхней и нижней обшивок, в ~2,9 раза, спустя 1 мес возросли в 2,3 раза для верхней обшивки и в 2,6 раза для нижней. По отношению к требуемому значению величина данного показателя увеличилась в 1,95 раза для верхней обшивки и в 1,65 раза для нижней, спустя 1 мес возросла в 1,56 и 1,52 раза соответственно. Характер разрушения образцов после механических испытаний в соответствии с НД – LFT (рис. 8). Однако следует отметить, что результаты испытаний образцов, склеенных после 1 мес хранения обшивок в условиях категории 1 размещения изделий (в соответствии с ГОСТ 15150–69), указывают на снижение прочности клеевого соединения, но это снижение незначительное и требует дополнительных исследований с увеличением времени хранения обшивок до 6 мес после обработки ПАД.

### Заключения

Проведенные исследования показали, что:

- подготовка поверхности методом обработки ПАД увеличивает прочность клеевого соединения «лонжерон–обшивка» при склеивании клеями холодного отверждения;
- прочность клеевого соединения «лонжерон–обшивка» с подготовленной поверхностью обшивки методом обработки ПАД соответствует требованиям НД на ЛНВ вертолета семейства «Ми»;
- наблюдается снижение прочности клеевого соединения «лонжерон–обшивка» при наличии временного разрыва между обработкой обшивки ПАД и операцией склеивания, в условиях хранения в складском помещении предприятия.
- необходимо проведение дополнительных исследований по оценке влияния временного разрыва между обработкой поверхности обшивки ПАД и операцией склеивания на прочность клеевого соединения.

### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докладов XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
2. Дорошенко Н.И., Чурсова Л.В. Эволюция материалов для лопастей вертолетов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2 (23). С. 16–18.
3. Давыдова И.Ф., Каблов Е.Н., Кавун Н.С. Термостойкие негорючие полиимидные стеклотекстолиты для изделий авиационной и ракетной техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 7. С. 2–11.
4. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Гусев Ю.А., Громова А.А. Разработка конструктивно-технологического решения листового стеклопластика для обшивок хвостовых отсеков лопасти несущего винта вертолета // Труды ВИАМ. 2016. № 1 (37). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-36-41.

5. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Плетинь И.И., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А. Разработка и производство конструкционных органопластиков для авиационной техники // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4–2. С. 411–416.
6. 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.
7. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Хрульков А.В. Новое поколение материалов и технологий для изготовления лонжеронов лопастей вертолета // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S2. С. 5–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-5-9.
8. Гребеников А.Г., Дьяченко Ю.В., Коллеров В.В. и др. Конструктивно-технологические особенности несущих поверхностей вертолета из полимерных композиционных материалов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2019. № 84. С. 4–49.
9. Завалов О.А., Башаров Е.А. Методические указания к лабораторной работе «Конструкция лопастей несущих и рулевых винтов». URL: <http://elibrary.mai.ru/MegaPro/Download/ToView/15843?idb=NewMAI2014> (дата обращения: 12.07.2021).
10. Слюсарь Б.Н., Флек М.Б., Гольдберг Е.С. и др. Технология вертолетостроения. Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2013. 230 с.
11. Тополев В.В. Конструкция и эксплуатация вертолета Ми-171. URL: [http://78.29.20.90/dw/lib/exe/fetch.php/ps:dikihvf:discip:mi-171\\_bortmexaniki\\_.pdf](http://78.29.20.90/dw/lib/exe/fetch.php/ps:dikihvf:discip:mi-171_bortmexaniki_.pdf) (дата обращения: 12.07.2021).
12. Дорошенко Н.И. Применение ПКМ в конструкции лопастей винтов вертолетов. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1234.pdf> (дата обращения: 12.07.2021).
13. Завалов О.А. Конструкция несущих и рулевых винтов вертолетов. URL: [http://www.kaf102.mai.ru/bibl\\_files/L\\_20.pdf](http://www.kaf102.mai.ru/bibl_files/L_20.pdf) (дата обращения: 12.07.2021).
14. Сохань О.Н., Скулков Д.Д. Втулки и лопасти несущих и рулевых винтов вертолетов: метод. указания к лабораторным работам. URL: [https://kaf102.mai.ru/bibl\\_files/L\\_06.pdf](https://kaf102.mai.ru/bibl_files/L_06.pdf) (дата обращения: 12.07.2021).
15. Ивчин В.А., Самсонов К.Ю. Результаты первого этапа летных испытаний вертолета – летающей лаборатории МИ-171А2 // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 200. С. 63–69.
16. Железина Г.Ф. Особенности разрушения органопластиков при ударных воздействиях // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 272–277.
17. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 11. С. 19–27.
18. Старцев В.О., Молоков М.В., Постнов В.И., Старостина И.В. Оценка влияния климатического воздействия на свойства стеклопластика марки ВПС-53К // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 4 (2). С. 220–228.
19. Постнов В.И., Плетинь И.И., Вешкин Е.А., Старостина И.В., Стрельников С.В. Технологические особенности производства тонколистовых обшивок лопастей вертолета из конструкционного стеклопластика ВПС-53К // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4 (3). С. 619–627.
20. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Аниховская Л.И. Клеящие материалы в конструкции лопастей вертолетов // Труды ВИАМ. 2016. № 7 (43). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-7-7.
21. Баранников А.А., Постнов В.И., Вешкин Е.А., Стрельников С.В. Роль подготовки поверхности стеклопластика под склеивание // Клеи. Герметики. Технологии. 2019. № 6. С. 19–27. DOI: 10.31044/1813-7008-2019-0-6-19-27.
22. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В. Структурные исследования клеевых соединений листов стеклопластика ВПС-53К, обработанных плазмой атмосферного давления // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 3. С. 27–33. DOI: 10.31044/1813-7008-2020-0-3-27-33.

23. Баранников А.А., Постнов В.И., Вешкин Е.А., Старостина И.В. Связь энергетических характеристик поверхности стеклопластика марки ВПС-53К с прочностью клеевого соединения на его основе // Труды ВИАМ. 2020. № 10 (92). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.
24. Tracey A.C. Effect of Atmospheric Pressure Plasma Treatment on Surface Characteristics and Adhesive Bond Quality of Peel Ply Prepared Composites. URL: <https://digital.lib.washington.edu/researchworks/handle/1773/27522> (дата обращения: 12.11.2020).
25. Takeda T., Yasuoka T., Hoshi H. et al. Effectiveness of flame-based surface treatment for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy matrix composites // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. Vol. 119. P. 30–37.
26. Zaldivar R.J., Nokes J., Steckel G.L. et al. The Effect of Atmospheric Plasma Treatment on the Chemistry, Morphology and Resultant Bonding Behavior of a Pan-Based Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composite // *Journal of Composite Materials*. 2009. Vol. 44. Is. 2. P. 137–156. DOI: 10.1177/0021998309345343.
27. Dighton C., Rezai A., Ogin S.L., Watts J.F. Atmospheric plasma treatment of CFRP composites to enhance structural bonding investigated using surface analytical techniques // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2019. Vol. 91. P. 142–149. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2019.03.010.
28. Zaldivar R.J., Steckel G.L., Morgan B.A. et al. Bonding Optimization on Composite Surfaces using Atmospheric Plasma Treatment // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2012. Vol. 26. Is. 1–3. P. 381–401.
29. Hansen W. Plasma for Aviation and Aerospace Industries. URL: [https://www.plasmatreat.com/downloads/english/15-04\\_IST\\_aerospace.pdf](https://www.plasmatreat.com/downloads/english/15-04_IST_aerospace.pdf) (дата обращения: 12.07.2021).
30. Лангер М., Отто Д. Методы исследования поверхностных характеристик полимеров после плазменной обработки. Сравнительный анализ // *Анализ и контроль: технологии, приборы, решения*. 2018. № 2 (39). С. 2–7.
31. Williams T., Yu H., Hicks R. Atmospheric pressure plasma activation of polymers and composites for adhesive bonding: A Critical Review // *Reviews of Adhesion and Adhesives*. 2013. Vol. 1. No. 1. P. 46–87. DOI: 10.7569/RAA.2013.097302.
32. Serrano J.S. Surface modifications of composite materials by atmospheric pressure plasma treatment: PhD-Thesis. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos, 2011. 302 p. URL: [https://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/11379/1/Thesis\\_June%202011%20JSS-SLU-AUF\\_v5.pdf](https://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/11379/1/Thesis_June%202011%20JSS-SLU-AUF_v5.pdf) (дата обращения: 12.07.2021).
33. Gleich H. Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie: Dissertation. Universität Duisburg-Essen, 2004. 103 p. URL: [https://duepublico2.unidue.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico\\_derivate\\_00005593/gleic\\_hdiss.pdf](https://duepublico2.unidue.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico_derivate_00005593/gleic_hdiss.pdf) (дата обращения: 04.04.2021).
34. Rodríguez B.N. Pre-Treatment for adhesive bonding of aerospace composite components: PhM-Thesis. London: Brunel University, 2016. 133 p. URL: <https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/14669/1/FulltextThesis.pdf> (дата обращения: 04.04.2021).
35. Al-Maliki H.L.R. Adhesive and tribological behaviour of cold atmospheric plasma-treated polymer surfaces: PhD Dissertation. Gödöllő: Szent István University, 2018. 115 p. URL: [https://szie.hu/sites/default/files/hayder\\_lateef\\_dissertation.pdf](https://szie.hu/sites/default/files/hayder_lateef_dissertation.pdf) (дата обращения: 04.04.2021).
36. Lisco F., Shaw A., Wright A. et al. Atmospheric-pressure plasma surface activation for solution processed photovoltaic devices // *Solar Energy*. 2017. Vol. 146. P. 287–297.
37. Kostova K.G., Nishimea T.M.C., Castroa A.H.R. et al. Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 314. P. 367–375.
38. Akiyama H., Hasegawa K., Sekigawa T., Yamazaki N. Atmospheric pressure plasma treatment for composites bonding // *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2018. Vol. 55. No. 2. P. 1–5.
39. Lucchetta G. Experimental analysis of atmospheric plasma treatment and resin optimization for adhesive bonding of carbon fiber/epoxy composites. URL: [http://tesi.cab.unipd.it/48832/1/Tesi\\_ANTONELLO\\_Julien.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/48832/1/Tesi_ANTONELLO_Julien.pdf) (дата обращения: 04.04.2021).
40. Валуева М.И., Колобков А.С., Малаховский С.С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-49-57.