
Научная статья

УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-83-98

ПРИМЕНЕНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКА МАРКИ ВПС-53К, ОБРАБОТАННОГО ПЛАЗМОЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ, В ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

А.А. Баранников¹, Ю.И. Судьин¹, Е.А. Вешкин¹, Р.А. Сатдинов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Статья посвящена опробованию стеклопластика марки ВПС-53К, обработанного плазмой атмосферного давления в производственных условиях предприятия-изготовителя лопастей несущего и рулевого винтов вертолета. Установлено, что обработка плазмой атмосферного давления увеличивает смачиваемость поверхности стеклопластика и прочность клеевого соединения «лонжерон–обшивка» из стеклопластика марки ВПС-53К. Гарантированный интервал времени между обработкой стеклопластика плазмой атмосферного давления и процессом склеивания составляет не более 6 мес.

Ключевые слова: вертолетная техника, лопасть несущего и рулевого винтов вертолетов, способ подготовки поверхности, плазма атмосферного давления, стеклопластик, краевой угол смачивания, свободная энергия поверхности, работа адгезии, прочность клеевого соединения

Для цитирования: Баранников А.А., Судьин Ю.И., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А. Применение стеклопластика марки ВПС-53К, обработанного плазмой атмосферного давления, в изготовлении изделия авиационной техники // Труды ВИАМ. 2022. № 9 (115). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-83-98.

Scientific article

APPLICATION OF FIBERGLASS BRAND VPS-53K, PROCESSED ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA, IN THE MANUFACTURE OF AIRCRAFT PRODUCTS

A.A. Barannikov¹, Yu.I. Sudyin¹, E.A. Veshkin¹, R.A. Satdinov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article is devoted to the testing of fiberglass grade VPS-53K treated with atmospheric pressure plasma in the production environment of the manufacturer of the main and tail rotor blades of a helicopter. It has been established that atmospheric pressure plasma increases the wettability of the fiberglass surface and the strength of the adhesive joint of «the spar–sheathing» (fiberglass grade VPS-53K). The guaranteed time interval between the processing of fiberglass with atmospheric pressure plasma and the gluing process is no more than 6 mon.

Keywords: helicopter technology, helicopter main and tail rotor blade, surface preparation method, atmospheric pressure plasma, fiberglass, wetting angle, surface free energy, adhesion work, adhesive bond strength

For citation: Barannikov A.A., Sudyin Yu.I., Veshkin E.A., Satdinov R.A. Application of fiberglass brand VPS-53K, processed atmospheric pressure plasma, in the manufacture of aircraft products. *Trudy VIAM*, 2022, no. 9 (115), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-83-98.

Введение

История отечественного материаловедения неразрывно связана с разработками НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ). Практически 95 % всех материалов, которые использовались и используются при создании отечественных летательных аппаратов – это материалы, разработанные в институте [1]. В настоящее время результатом многолетних усилий коллектива института, в том числе и в развитии науки о полимерных композиционных материалах (ПКМ), являются разработанные в рамках реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» ПКМ нового поколения, которые находят все большее применение при создании современной отечественной гражданской и специальной авиационной техники, конкурентоспособной на мировом рынке [2–5].

Одним из направлений широкого применения ПКМ нового поколения является их применение в конструкциях вертолетной техники. Количество авиационной техники гражданского и военного назначения, изготовленной из ПКМ нового поколения, растет беспрецедентными темпами.

В настоящее время доля использования ПКМ в конструкциях вертолетной техники на отдельных экземплярах машин достигает 86 % от массы планера. Примером такого использования ПКМ является многоцелевой вертолет NH-90 компания Airbus (доля ПКМ от массы планера составляет 86 %) или многоцелевой вертолет Ка-62 разработки НЦВ «Миль и Камов» (доля ПКМ от массы планера составляет 60 %) [6].

Применение ПКМ в элементах конструкции вертолетов расширилось за последние несколько десятилетий – они используются не только в средне- и малонагруженных, но и в силовых и особо ответственных изделиях. Одним из примеров такой конструкции являются лопасти несущего и рулевого винтов вертолета.

Такие конструкции являются наиболее ответственными агрегатами вертолетной техники, выполняющими множество функций: несущей системы, движителя, органа управления.

Отечественные вертолеты все больше оснащаются винтами с лопастями, полностью выполненными из ПКМ, что способствует повышению надежности, ресурса и живучести не только лопастей винтов, но и всего вертолета в целом. Конструктивный облик таких лопастей во многом предопределяется сложными условиями их работы и количеством действующих на них нагрузок [7]. Наиболее распространенным конструктивным обликом, применяемым в отечественных лопастях несущего и рулевого винтов, является конструкция с разрезным хвостовым отсеком (рис. 1).

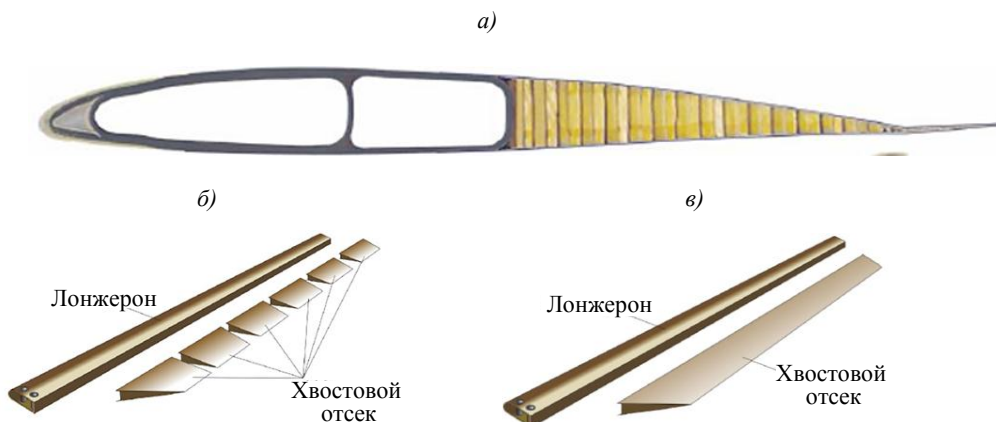


Рис. 1. Общий вид конструктивно-силовой схемы (а) лопастей с разрезным хвостовым отсеком несущего (б) и рулевого (в) винтов вертолета

Для изготовления несущего и рулевого винтов применяются современные материалы и технологии. Несколько десятков лет НЦВ «Миль и Камов» тесно взаимодействует с ВИАМ по улучшению эксплуатационных характеристик лопастей. В рамках данных работ разработан конструкционный стеклопластик марки ВПС-53К (далее – материал) для изготовления обшивок хвостовых отсеков (далее – отсек). Данный материал обладает высоким сопротивлением усталости и повышенной климатической стойкостью [6, 8–10].

В ходе освоения данного материала на предприятии-изготовителе (далее – предприятие) лопастей для вертолетной техники установлено, что при формировании особо ответственного участка, напрямую влияющего на надежность конструкции лопасти несущего винта, а именно участка клеевого соединения отсеков с лонжероном (рис. 2), существующий способ подготовки поверхности обшивок из материала – зашкуривание (матирование), имеющийся на предприятии, не обеспечивает требуемого значения прочности клеевого соединения, установленного нормативной документацией (НД) на лопасть несущего винта [11–13].

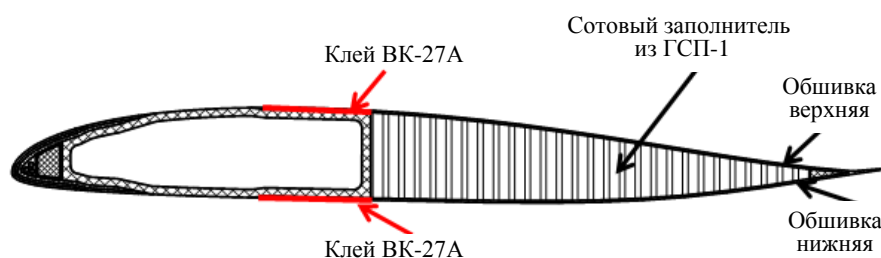


Рис. 2. Зона клеевого соединения хвостового отсека с лонжероном

При проведении научно-исследовательских работ специалистами ВИАМ подобран способ подготовки поверхности обшивок из материала с помощью обработки плазмой атмосферного давления, позволяющий обеспечить прочность данного клеевого соединения в соответствии с НД. Применение данного способа позволило повысить прочность клеевого соединения по ГОСТ Р 57832–2017 в ~4,5 раза по сравнению с зашкуриванием (матированием). Установлено также, что допустимый интервал времени хранения между обработкой поверхности материала плазмой и процессом склеивания составляет не более 6 мес [14].

В ходе предварительного опробования применения плазмы (как способа подготовки поверхности материала) в условиях предприятия, установлено, что значение прочности клеевого соединения в соответствии с НД на лопасть несущего винта возросло в 2,9 раза по сравнению с матированием. Сотрудниками ВИАМ разработана технология подготовки поверхности материала и выпущена вся необходимая НД [11–13, 15, 16]. В этой связи перед специалистами ВИАМ и предприятия поставлена собой задача – разработать технологию подготовки поверхности материала и провести ее опробование в условиях предприятия.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» [2].

Материалы и методы

Опробование обшивок из материала, поверхность которого обработана плазмой, проводилось в несколько этапов в соответствии с программой совместных работ.

На первом этапе предприятие передало обшивки в ВИАМ для их исследования и последующей обработки плазмой. Проведены следующие исследования по определению:

– свойств поверхности (краевой угол смачивания (КУС), свободная энергия поверхности (СЭП) и ее составляющая, работа адгезии (W_a)), подлежащей склеиванию. Определение КУС осуществляли при помощи автоматизированного гониометра и его программного обеспечения, позволяющего определять СЭП с ее составляющими и параметр W_a ;

– прочности клеевого соединения в исходном состоянии и после обработки плазмой; прочность клеевого соединения определяли методом сопротивления отслаиванию клеевых соединений по ГОСТ Р 57832–2017 (далее – испытание 1);

– свойств поверхности и прочности клеевого соединения между обработкой поверхности материала и процессом склеивания через каждые 30 сут хранения в течение 6 мес. Хранение обработанных обшивок осуществляли в условиях категории 1 размещения изделий по ГОСТ 15150–69 в производственных условиях ВИАМ (далее – категория 1);

На втором этапе на предприятии проводили изготовление отсеков с обшивками из материала с обработкой плазмой и без нее, а также их склейку с новой частью лопасти. Процесс изготовления осуществляли в сборочно-клеечном приспособлении и стапеле общей сборки (рис. 3).

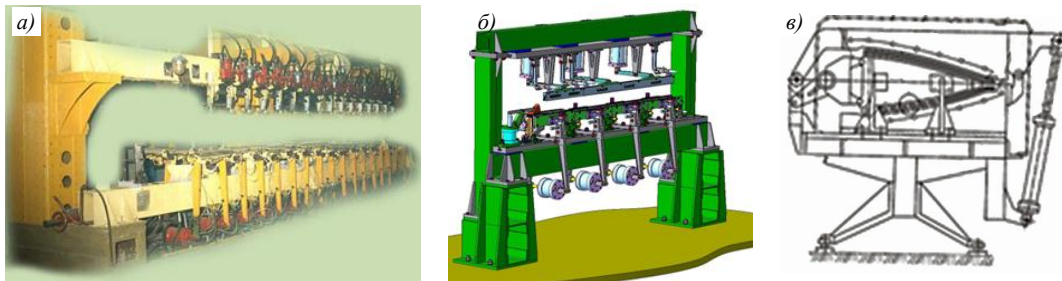


Рис. 3. Вид стапеля (а) и компьютерная модель секции стапеля (б) общей сборки лопасти несущего винта, а также сборочно-клеечное приспособление для склейки хвостового отсека (в)

На третьем этапе проводили механические испытания по определению усилия отрыва хвостового отсека от носовой части лопасти (далее – испытание 2) и прочности при равномерном отрыве обшивок от сотового заполнителя (далее – испытание 3) в соответствии с НД на лопасть несущего винта. При испытании 1 использовали специальную установку (рис. 4), а при испытании 3 – универсальную испытательную машину.



Рис. 4. Общий вид специальной установки для испытаний лопасти несущего винта

На четвертом этапе через каждые 30 сут хранения в течение 6 мес проводили изготовление отсеков с обшивками из материала, обработанного плазмой и последующих механических испытаний 1 и 2 в соответствии с НД на лопасть. Хранение обработанных заготовок осуществляли в условиях размещения изделий категории 1.

Результаты и обсуждение

В ходе выполнения первого этапа программы предприятием переданы в ВИАМ заготовки обшивок, выполненных из ПКМ в количестве 80 шт. (рис. 5, а). Их обработку плазмой проводили с одной стороны, которая представляла собой шероховатую поверхность – оттиск от снятия жертвенного слоя, регламентированный НД на материал (рис. 5, б). Из каждой партии обработанных плазмой обшивок отбирали одну заготовку для проведения выходного контроля. Данные заготовки были определены заранее ввиду необходимости определения значения КУС в исходном состоянии и после обработки плазмой. Партией считалось 20 шт. обработанных плазмой обшивок. В соответствии с разработанной технологией подготовки поверхности материала из каждой обшивки соответствующей партии изготавливали образцы клеевого соединения и проводили их испытание 1 (табл. 1).

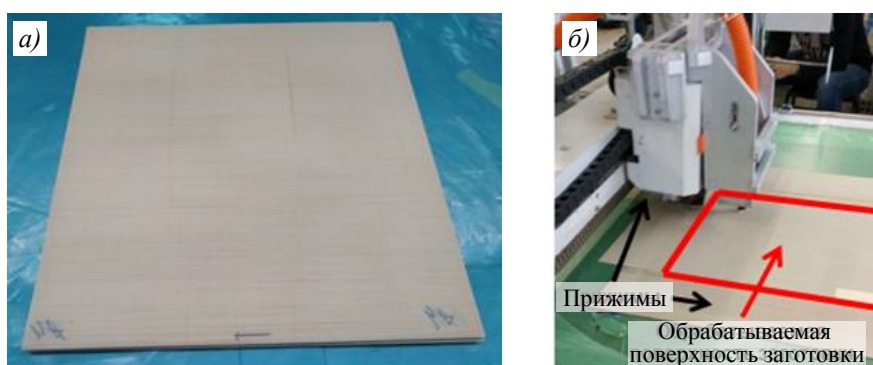


Рис. 5. Обработка заготовок плазмой атмосферного давления

Результаты представлены в табл. 1. За результат принималось среднее значение из 5 измерений по каждой партии.

Таблица 1

Результаты выходного контроля партий заготовок, обработанных плазмой атмосферного давления

Условный номер партии	Сопротивление отслаиванию, Н/мм		
	требуемое по НД	в исходном состоянии	после обработки плазмой
1	Не менее 1	<u>0,04–0,06</u> 0,06	<u>1,85–2,20</u> 2,01
2		<u>0,04–0,07</u> 0,04	<u>1,60–2,10</u> 1,86
3		<u>0,04–0,06</u> 0,05	<u>1,80–2,00</u> 1,92
4		<u>0,04–0,06</u> 0,06	<u>1,50–1,90</u> 1,90

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

Установлено, что все партии обшивок, обработанных плазмой, соответствуют заявленным требованиям. Сопротивление отслаиванию увеличилось в 37 раз. Необходимо отметить, что характер разрушения образцов изменился с адгезионного (до обработки плазмой) на преимущественное разрушение из-за слабого разрыва волокна (после обработки плазмой). Анализ характера разрушения проводили в соответствии с ГОСТ Р 56977–2016 и при помощи оптического микроскопа.

По окончании обработки обшивок плазмой и проведения выходного контроля, результаты которого представлены в табл. 1, 70 обшивок переданы обратно предприятию для проведения дальнейших работ в соответствии с программой. Оставшиеся заготовки использовали для проведения последующих исследований.

Определение КУС проводили с помощью тестовых жидкостей – дистиллированной воды и глицерина. Результаты определения КУС в исходном состоянии и после обработки плазмой представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения краевого угла смачивания

Условный номер партии	Краевой угол смачивания*, градус			
	в исходном состоянии		после обработки плазмой	
	в дистиллированной воде	в глицерине	в дистиллированной воде	в глицерине
1	$\frac{79-87}{82}$	$\frac{70-74}{72}$	0	$\frac{0-31}{8}$
2	$\frac{81-86}{83}$	$\frac{70-75}{71}$	0	$\frac{0-6}{4}$
3	$\frac{83-87}{85}$	$\frac{70-75}{72}$	$\frac{0-5}{1}$	$\frac{4-12}{9}$
4	$\frac{74-83}{80}$	$\frac{70-75}{71}$	0	$\frac{0-11}{5}$

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

Поверхность обшивки после обработки плазмой сменила свое состояние с гидрофобного на гидрофильное, что подтверждается изменением значений КУС (табл. 2). Они снижаются: для дистиллированной воды – на 100 %, для глицерина – на 92 %.

По результатам измерения КУС получены значения СЭП и ее составляющих, а также параметра W_a , с использованием метода расчета Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле (ОВРК) [14, 17, 18]. Результаты представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Результаты определения свободной энергии поверхности на границе «твердое тело–жидкость» (γ_{SL}) и ее составляющих: дисперсионной (γ_{SL}^d) и полярной (γ_{SL}^p)

Условный номер партии	Состояние поверхности	Свободная энергия поверхности, мН/м			Коэффициент корреляции
		γ_{SL}	γ_{SL}^d	γ_{SL}^p	
1	В исходном состоянии	25,95	17,21	8,74	1
	После обработки плазмой	73,04	8,78	64,26	1
2	В исходном состоянии	30,26	24,70	5,56	1
	После обработки плазмой	79,09	9,55	69,54	1
3	В исходном состоянии	31,05	25,3	5,75	1
	После обработки плазмой	79,06	8,07	70,99	1
4	В исходном состоянии	30,25	24,7	5,56	1
	После обработки плазмой	78,02	10,68	67,34	1

Таблица 4

Результаты определения значений работы адгезии (W_a)

Условный номер партии	Состояние поверхности	W_a , мН/м
1	В исходном состоянии	82
	После обработки плазмой	131
2	В исходном состоянии	83
	После обработки плазмой	137
3	В исходном состоянии	83
	После обработки плазмой	136
4	В исходном состоянии	83
	После обработки плазмой	132

По результатам проведенных исследований установлено, что после обработки плазмой атмосферного давления СЭП возрастают в 2,6 раза, а W_a – в 1,6 раза. Одновременно с этим установлено, что полярная составляющая СЭП после обработки плазмой возрастает в среднем в 11 раз по сравнению с нативным состоянием. Полярная составляющая СЭП после обработки плазмой преобладает над ее дисперсионной составляющей в $\sim 7,4$ раза и в ~ 3 раза над ней же в нативном состоянии. Следует также отметить, что обрабатываемая поверхность в нативном состоянии имеет небольшое число полярных групп (табл. 3), однако их количества недостаточно для формирования прочного адгезионного соединения (табл. 1). На основании полученных результатов и теории адгезии можно констатировать, что с ростом полярной составляющей СЭП и ее преобладанием над дисперсионной составляющей возрастает адгезионная прочность клеевого соединения [19–39], что подтверждается результатами, представленными в табл. 1 и 4.

Параллельно с проведением механических испытаний и исследованиями свойств поверхности обработанных обшивок заложены образцы для определения свойств поверхности материала и прочности клеевого соединения на его основе после их хранения между обработкой плазмой и процессом склеивания через 1, 3 и 6 мес. Хранение обработанных заготовок осуществляли в условиях категории 1 в производственных условиях ВИАМ. Результаты, полученные в ходе исследований, представлены в табл. 5–7.

Таблица 5

Результаты определения краевого угла смачивания в дистиллированной воде (ж. 1) и глицерине (ж. 2) через 1, 3 и 6 мес хранения

Условный номер партии	Краевой угол смачивания в жидкой среде, градус, после хранения образцов в течение, мес					
	1		3		6	
	ж. 1	ж. 2	ж. 1	ж. 2	ж. 1	ж. 2
1	<u>25–31</u>	<u>27–36</u>	<u>28–33</u>	<u>35–41</u>	<u>37–43</u>	<u>41–45</u>
	28	32	33	38	40	43
2	<u>26–33</u>	<u>28–35</u>	<u>33–38</u>	<u>37–42</u>	<u>39–44</u>	<u>41–46</u>
	29	32	35	39	41	43
3	<u>26–33</u>	<u>30–34</u>	<u>32–37</u>	<u>37–40</u>	<u>39–44</u>	<u>42–46</u>
	30	32	35	39	42	44
4	<u>28–34</u>	<u>30–34</u>	<u>32–37</u>	<u>33–40</u>	<u>40–43</u>	<u>44–46</u>
	31	32	34	37	41	45

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

Таблица 6

**Результаты определения свободной энергии поверхности
на границе «твердое тело–жидкость» (γ_{SL}) и ее составляющих:
дисперсионной (γ_{SL}^d) и полярной (γ_{SL}^p), через 1, 3 и 6 мес хранения образцов**

Условный номер партии	Продолжительность хранения, мес	Свободная энергия поверхности, мН/м			Коэффициент корреляции
		γ_{SL}	γ_{SL}^d	γ_{SL}^p	
1	1	74,52	5,13	69,39	1
	3	72,13	4,31	67,12	1
	6	64,65	5,06	59,09	1
2	1	75,82	6,11	69,71	1
	3	73,68	5,42	68,26	1
	6	65,70	6,36	59,34	1
3	1	76,21	6,22	69,99	1
	3	73,56	5,36	68,2	1
	6	69,2	5,45	63,75	1
4	1	76,41	6,15	70,26	1
	3	71,96	5,35	66,61	1
	6	60,22	5,02	55,2	1

Таблица 7

**Результаты определения значений работы адгезии (W_a)
через 1, 3 и 6 мес хранения образцов**

Условный номер партии	Продолжительность хранения, мес	W_a , мН/м
1	1	127
	3	124
	6	119
2	1	129
	3	126
	6	120
3	1	127
	3	126
	6	120
4	1	127
	3	125
	6	118

Установлено, что при увеличении интервала времени между обработкой плазмой и процессом склеивания образцов наблюдается увеличение значений КУС (табл. 5). Для стеклопластиков значения СЭП и W_a уменьшаются после хранения (табл. 6 и 7):

Продолжительность хранения, мес	Снижение значений, %	
	СЭП	W_a
1	2	5
2	6	7
3	16	11

При этом поверхность заготовок сохраняет свою гидрофильность на всем временном отрезке исследования.

По окончании обработки заготовок плазмой атмосферного давления и исследования их поверхности 70 заготовок переданы обратно предприятию для проведения дальнейших исследований.

В ходе выполнения второго этапа в соответствии с действующим на предприятии технологическим процессом (за исключением операции матирования для обшивок, обработанных плазмой) изготовлены отсеки с обшивками с обработкой и без обработки плазмой (рис. 6, а). После изготовления отсеки склеены с носовой частью лопасти в соответствии с действующим технологическим процессом (рис. 6, б).

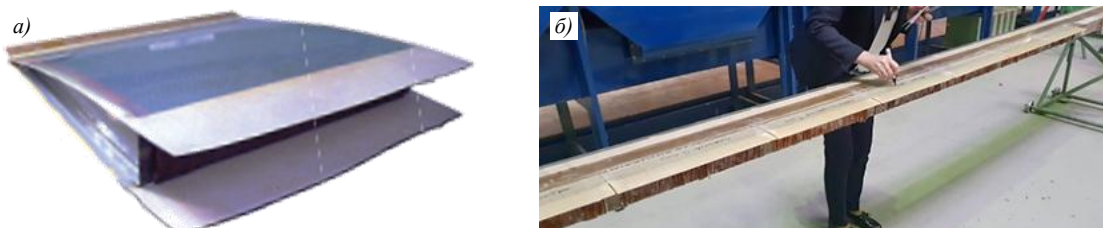


Рис. 6. Общий вид хвостового отсека для лопасти несущего винта вертолета (а) и технологический процесс склейки (б)

В ходе выполнения третьего этапа из отсеков вырезаны образцы для проведения испытания 3. Далее отсеки подготовлены к проведению механических испытаний 2 (рис. 7, а).

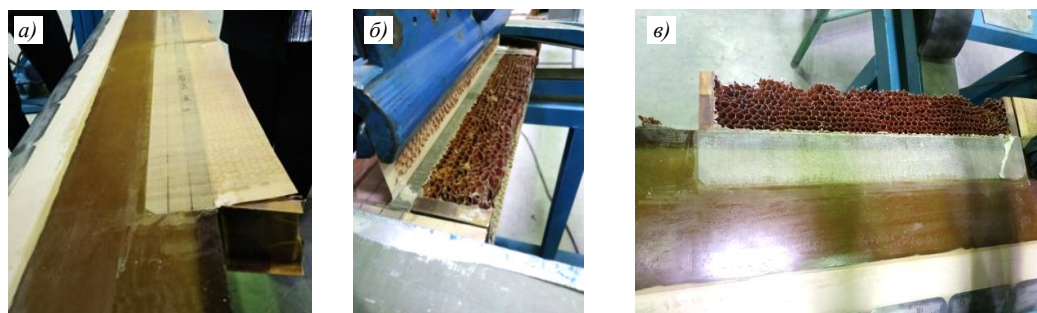


Рис. 7. Общий вид хвостового отсека, подготовленного к испытанию (а) и в процессе проведения испытания (б), а также вид носовой части лопасти (в) после определения усилия отрыва при срыве хвостового отсека

После подготовительных работ проведены механические испытания отсеков (рис. 7, б, в), результаты которых представлены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты механических испытаний хвостовых отсеков

Свойства	Страна хвостового отсека	Значения свойств*		
		по НД	в исходном состоянии	после обработки плазмой
Усилие отрыва при срыве хвостового отсека от носовой части лопасти, Н	Верх	Не менее 4,0	<u>2,8–2,9</u> 2,84	<u>6,89–9,83</u> 8,84
	Низ		<u>2,3–2,6</u> 2,42	<u>6,67–8,11</u> 7,37
Прочность при равномерном отрыве обшивок от сотового заполнителя, МПа	–	0,8	<u>1,4–1,6</u> 1,5	<u>1,59–1,7</u> 1,6

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

Выявлено, что после обработки плазмой усилие отрыва при срыве отсека от носовой части лопасти соответствует требованиям НД и в среднем возрастает в 3,1 раза. При этом характер разрушения изменяется с СОН на FT(5–60 %)-СОН (СОН – когезионное

разрушение; FT – разрыв волокон). Прочность при равномерном отрыве обшивок от сотового заполнителя соответствует требованиям НД и остается на достаточно высоком уровне. Характер разрушения как в исходном состоянии, так и после обработки плазмой – по сотовому заполнителю.

Одновременно с этим для выполнения четвертого этапа обработанные плазмой обшивки размещали на хранение в производственных условиях предприятия, соответствующих категории 1 по ГОСТ 15150–69, сроком на 1, 2, 3, 4, 5 и 6 мес.

В ходе выполнения четвертого этапа через каждые 30 сут в течение 6 мес проводили изготовление хвостовых отсеков с обшивками из стеклопластика после обработки плазмой и последующих механических испытаний по определению усилия отрыва при срыве хвостового отсека от носовой части лопасти и прочности при равномерном отрыве обшивок от сотового заполнителя. Результаты испытаний представлены в табл. 9.

Таблица 9

Результаты механических испытаний хвостовых отсеков со сроком хранения обшивок от 1 до 6 мес

Свойства	Срок хранения обшивок, мес	Сторона хвостового отсека	Требуемое значение	Фактическое значение*	
Усилие отрыва при срыве хвостового отсека от носовой части лопасти, Н	1	Верх	Не менее 4,0	<u>3,39–6,72</u> 5,88	
		Низ		<u>8,89–10,11</u> 9,66	
	2	Верх		<u>5,22–8,28</u> 7,67	
		Низ		<u>3,98–6,89</u> 5,81	
	3	Верх		Не менее 4,0	<u>7,56–9,06</u> 8,57
		Низ			<u>5,44–7,67</u> 6,92
	4	Верх	<u>6,50–8,94</u> 7,85		
		Низ	<u>4,39–7,83</u> 5,62		
	5	Верх	<u>7,5–9,83</u> 8,69		
		Низ	<u>6,50–8,06</u> 7,39		
	6	Верх	<u>6,06–9,28</u> 8,16		
		Низ	<u>5,50–7,06</u> 6,52		
Прочность при равномерном отрыве обшивок от сотового заполнителя, МПа	1	–	8,0		<u>1,37–1,48</u> 1,44
	2	–			<u>1,34–1,51</u> 1,44
	3	–			<u>1,52–1,68</u> 1,59
	4	–			<u>1,45–1,60</u> 1,52
	5	–		<u>1,07–1,61</u> 1,38	
	6	–		<u>1,25–1,52</u> 1,43	

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

При анализе результатов, представленных в табл. 9, установлено, что усилие отрыва при срыве отсеков от носовой части лопасти и прочность при равномерном отрыве обшивок от сотового заполнителя соответствуют требованиям НД после хранения обработанных плазмой обшивок до процесса изготовления отсеков на всем временном отрезке исследования. При этом характер разрушения при определении усилия отрыва при срыве отсеков от носовой части лопасти преимущественно сохраняется FT(5–98 %)-СОН (рис. 8) на всем временном отрезке. Характер разрушения образцов при определении прочности при равномерном отрыве обшивок от сотового заполнителя – преимущественно по сотовому заполнителю. Следует отметить, что сопоставление характера разрушения и значения усилия отрыва при срыве отсеков от носовой части лопасти показало, что, как правило, минимальное полученное значение усилия отрыва соответствует максимальному расслоению обшивки отсека в процессе механических испытаний. Так, при испытаниях отсека с обшивками, обработанными плазмой и взятыми после хранения 1 мес в производственных условиях предприятия, получено значение усилия отрыва 3,39 Н при срыве отсека от носовой части лопасти, что соответствовало 95 %-ному расслоению обшивки по всей площади склеивания.

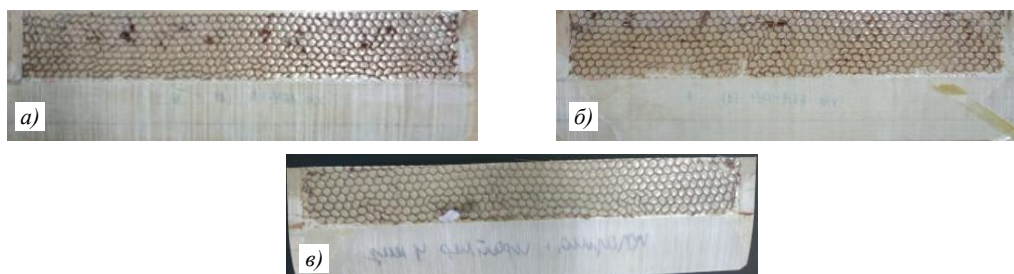


Рис. 8. Характер разрушения обшивки хвостового отсека при проведении механических испытаний по определению усилия отрыва при срыве хвостового отсека от носовой части лопасти в исходном состоянии (а) и после обработки обшивки плазмой без хранения (б) и после 6 мес хранения (в)

Заключения

По итогам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- поверхность стеклопластика после обработки плазмой атмосферного давления становится гидрофильной, увеличиваются СЭП и W_a , что способствует увеличению смачиваемости поверхности и прочности клеевого соединения на его основе, что подтверждается результатами механических испытаний;
- разработанная технология подготовки поверхности ПКМ плазмой атмосферного давления позволяет повысить прочность клеевого соединения по ГОСТ Р 57832–2017 в 37 раз, а усилие отрыва при срыве отсека от носовой части лопасти – в 3,1 раза в соответствии с НД на лопасть;
- гарантированный срок хранения стеклопластика, обработанного плазмой атмосферного давления, составляет не менее 6 мес. При этом значения усилия отрыва при срыве отсека от носовой части лопасти и сопротивления отслаиванию (на протяжении всего временного отрезка исследований) остаются на достаточно высоком уровне;
- разработанная технология подготовки поверхности ПКМ с помощью плазмы может заменить существующие на предприятии способы подготовки поверхности ПКМ под склеивание, что позволит повысить качество подготовки поверхности и изготовление изделия в целом, сократить трудоемкость и издержки при производстве лопасти несущего винта и других изделий из ПКМ с учетом того, что обработка плазмой атмосферного давления является экологически чистым способом подготовки поверхности под адгезионные процессы.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
4. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
5. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
6. Башаров Е.А., Вагин А.Ю. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов // Труды МАИ. 2017. № 92. С. 1–33.
7. Дорошенко Н.И., Чурсова Л.В. Эволюция материалов для лопастей вертолетов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2 (23) С. 16–18.
8. Дорошенко Н.И. Применение ПКМ в конструкции лопастей винтов вертолетов // Полимерные композиционные материалы для авиакосмической отрасли: материалы Всерос. науч.-техн. конф. (г. Москва, 6 дек. 2019 г.). М.: ВИАМ, 2019. 208 с.
9. 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.
10. 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: 12.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-36-41.
11. 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 (34). С. 5–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-5-9.
12. 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: 12.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.
13. Баранников А.А., Постнова М.В., Крашенинникова Е.В., Васюков А.Н. Применение новых технологий в производстве лопастей несущего винта вертолета // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-91-102.
14. Баранников А.А., Судьин Ю.И., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А. Определение допустимого времени хранения полимерных композиционных материалов после обработки поверхности плазмой атмосферного давления перед склеиванием // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-26-40.
15. 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.
16. Баранников А.А., Постнов В.И., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А. Применение плазмы атмосферного давления как способ подготовки поверхности полимерных композиционных материалов под склеивание // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. (г. Москва, 19 нояб. 2021 г.). М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. 259 с.

17. Operating manual OCA 15EC: Version 1.0; English; Valid as of firmware version 10.27, and SCA software version 4.4.1 Build 1046. Data Physics Instruments GmbH. URL: <https://vdocuments.site/manual-sca20-u.html> (дата обращения: 15.04.2022).
18. Thomsen F. Practical Contact Angle Measurement (5). Custom – made models: from contact angle to surface free energy // KRUSS Technical Note TN315e. P. 1–6. URL: https://warwick.ac.uk/fac/cross_fac/sciencecity/programmes/internal/themes/am2/booking/dropsha_reanalyser/practical_contact_angle_measurement_5.pdf (дата обращения: 15.04.2022).
19. 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.
20. Богданова Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов: учеб. пособие для студ. по спец. «Композиционные наноматериалы». М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 68 с.
21. Вильнав Ж.Ж. Клеевые соединения. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
22. Кейгл Ч. Клеевые соединения / под ред. Д.А. Кардашова. М.: Мир, 1971. 295 с.
23. MIL-HDBK-17-3F: Composite materials handbook. Volume 3 of 5. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis / CMH-17 Secretariat, Materials Sciences Corporation. Horsham, 2002. 734 с.
24. Peters S.T. Handbook of Composites. Second Edition. New York: Chapman & Hall, 1998. 1120 с.
25. 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).
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. Hansen W. Plasma for Aviation and Aerospace Industries. URL: https://www.plasmatreat.com/downloads/english/15-04_IST_aerospace.pdf (дата обращения: 12.07.2021).
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 (дата обращения: 12.12.2021).
33. Gleich H. Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie: dis. Universtät Duisburg-Essen, 2004. 103 p. URL: https://duepublico2.unidue.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico_derivate_00005593/gleichdiss.pdf (дата обращения: 12.12.2021).
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: 12.12.2021).

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 (дата обращения: 12.12.2021).
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 (дата обращения: 12.12.2021).

References

1. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFBR*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
4. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
5. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
6. Basharov E.A., Vagin A.Yu. Analysis of the use of composite materials in the design of helicopter airframes. *Trudy MAI*, 2017, no. 92, pp. 1–33.
7. Doroshenko N.I., Chursova L.V. Evolution of materials for blades of helicopters. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 2, pp. 16–18.
8. Doroshenko N.I. Application of PCM in the design of helicopter propeller blades. *Polymer composite materials for the aerospace industry: materials of All-Rus. sci.-tech. conf.* (Moscow, December 6, 2019). Moscow: VIAM, 2019, 208 p.
9. Davydova I.F., Kablov E.N., Kavun N.S. Heat-resistant non-combustible polyimide fiberglass for products of aviation and rocket technology. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2009, no. 7, pp. 2–11.
10. Popov Y.O., Kolokolceva T.V., Gusev Y.A., Gromova A.A. Development of the constructive and technological solution for a sheet fibreglass for tail section skins of helicopter rotor blades. *Trudy VIAM*, 2016, no. 1 (37), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-42-49.
11. Popov Yu.O., Kolokoltseva T.V., Khrulkov A.V. The new generation of materials and technologies for helicopter blade spars. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S2, pp. 5–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S2-5-9.
12. Barannikov A.A., Postnov V.I., Veshkin E.A., Starostina I.V. Link between the energy characteristics of the surface of fiberglass of the VPS-53K brand and the strength of the adhesive joint based on it. *Trudy VIAM*, 2020, no. 10 (92), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.
13. Barannikov A.A., Postnova M.V., Krasheninni-kova E.V., Vasyukov A.N. Application of new technologies in the production of helicopter main rotor blades. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 9, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-91-102.

14. Barannikov A.A., Sudyin Yu.I., Veshkin E.A., Satdinov R.A. Determination of the permissible storage time of polymeric composite materials after surface treatment with atmospheric pressure plasma before bonding. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 1, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-26-40.
15. Barannikov A.A., Postnov V.I., Veshkin E.A., Strelnikov S.V. The role of fiberglass surface preparation for gluing. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2019, no. 6, pp. 19–27. DOI: 10.31044/1813-7008-2019-0-6-19-27.
16. Barannikov A.A., Postnov V.I., Veshkin E.A., Satdinov R.A. The use of atmospheric pressure plasma as a method of preparing the surface of polymer composite materials for gluing. *Polymer composite materials and production technologies of a new generation: materials of V All-Rus. sci.-tech. conf.* (Moscow, November 19, 2021). Moscow: NRC "Kurchatov Institute" – VIAM, 2021, 259 p.
17. *Operating manual OCA 15EC: Version 1.0; English; Valid as of firmware version 10.27, and SCA software version 4.4.1 Build 1046.* Data Physics Instruments GmbH. Available at: <https://vdocuments.site/manual-sca20-u.html> (accessed: April 15, 2022).
18. Thomsen F. Practical Contact Angle Measurement (5). Custom – made models: from contact angle to surface free energy. *KRUSS Technical Note TN315e*, pp. 1–6. Available at: https://warwick.ac.uk/fac/cross_fac/sciencecity/programmes/internal/themes/am2/booking/dropsha_peanalyser/practical_contact_angle_measurement_5.pdf (accessed: April 15, 2022).
19. Langer M., Otto D. Methods for studying the surface characteristics of polymers after plasma treatment. Comparative analysis. *Analiz i kontrol: tekhnologii, pribory, resheniya*, 2018, no. 2 (39), pp. 2–7.
20. Bogdanova Yu.G. *Adhesion and its role in ensuring the strength of polymer composites: textbook for students according to special "Composite nanomaterials"*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2010, 68 p.
21. Vilnave Zh.Zh. *Adhesive connections*. Moscow: Technosfera, 2007, 384 p.
22. Cagle Ch. *Adhesive connections*. Ed. D.A. Kardashov. Moscow: Mir, 1971, 295 p.
23. MIL-HDBK-17-3F: Composite materials handbook. Volume 3 of 5. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis. *CMH-17 Secretariat, Materials Sciences Corporation*. Horsham, 2002, 734 c.
24. Peters S.T. *Handbook of Composites*. Second Edition. New York: Chapman & Hall, 1998, 1120 c.
25. Tracey A.C. *Effect of Atmospheric Pressure Plasma Treatment on Surface Characteristics and Adhesive Bond Quality of Peel Ply Prepared Composites*. Available at: <https://digital.lib.washington.edu/researchworks/handle/1773/27522> (accessed: November 12, 2020).
26. 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, pp. 30–37.
27. 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, pp. 137–156. DOI: 10.1177/0021998309345343.
28. 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.
29. 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, pp. 381–401.
30. Hansen W. *Plasma for Aviation and Aerospace Industries*. Available at: https://www.plasmatreat.com/downloads/english/15-04_IST_aerospace.pdf (accessed: July 12, 2021).

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, pp. 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. Available at: https://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/11379/1/Thesis_June%202011%20JSS-SLU-AUF_v5.pdf (accessed: December 12, 2021).
33. Gleich H. *Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie*: dis. Universtät Duisburg-Essen, 2004, 103 p. Available at: https://duepublico2.unidue.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico_derivate_00005593/gleic_hdiss.pdf (accessed: December 12, 2021).
34. Rodríguez B.N. *Pre-Treatment for adhesive bonding of aerospace composite components*: PhM-Thesis. London: Brunel University, 2016, 133 p. Available at: <https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/14669/1/FulltextThesis.pdf> (accessed: December 12, 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. Available at: https://szie.hu/sites/default/files/hayder_lateef_dissertation.pdf (accessed: December 12, 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, pp. 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, pp. 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, pp. 1–5.
39. Lucchetta G. *Experimental analysis of atmospheric plasma treatment and resin optimization for adhesive bonding of carbon fiber/epoxy composites*. Available at: http://tesi.cab.unipd.it/48832/1/Tesi_ANTONELLO_Julien.pdf (accessed: December 12, 2021).

Информация об авторах

Баранников Александр Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Судьин Юрий Иванович, инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вешкин Евгений Алексеевич, начальник филиала, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сатдинов Руслан Амиржанович, заместитель начальника филиала по производству, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander A. Barannikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yury I. Sudyin, Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny A. Veshkin, Head of USTC, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ruslan A. Satdinov, Deputy Head of USTC for production, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.06.2022.

The article was submitted 06.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 23.06.2022.