

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-26-40

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАЗМОЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПЕРЕД СКЛЕИВАНИЕМ

А.А. Баранников<sup>1</sup>, Ю.И. Судьин<sup>1</sup>, Е.А. Вешкин<sup>1</sup>, Р.А. Сатдинов<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Представлены результаты исследования по определению допустимого интервала времени хранения полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов между обработкой их поверхности плазмой атмосферного давления и процессом склеивания. Установлено, что данный интервал времени составляет не более 6 мес. При этом поверхность стеклопластика марки ВПС-53К и углепластика марки ВКУ-30К.УМТ49 остается гидрофильной. Морфологические изменения носят схожий характер как в день обработки поверхности склеиваемых материалов, так и спустя 1, 3 и 6 мес хранения. Свободная энергия поверхности и работа адгезии также остаются на должном высоком уровне. Установлено, что при увеличении интервала времени между обработкой ПАД и процессом склеивания наблюдается снижение прочности клеевого соединения.

**Ключевые слова:** стеклопластик, углепластик, сопротивление отслаиванию, лопасть несущего винта вертолета, клеевое соединение, плазма атмосферного давления, клеевой сдвиг, краевой угол смачивания, свободная энергия поверхности, время хранения обработанных поверхностей

**Для цитирования:** 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-26-40.

Scientific article

## DETERMINATION OF THE PERMISSIBLE STORAGE TIME OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS AFTER SURFACE TREATMENT WITH ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA BEFORE BONDING

A.A. Barannikov<sup>1</sup>, Yu.I. Sudyin<sup>1</sup>, E.A. Veshkin<sup>1</sup>, R.A. Satdinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal 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 notes the results of a study to determine the permissible storage time interval between the surface treatment of polymer composite materials based on adhesive prepreps by atmospheric pressure plasma and the bonding process. It was found that this time interval is no more than 6 months. At the same time, the surface of VPS-53K fiberglass and VKU-30K.UMT49 carbon fiber remains hydrophilic. Morphological changes are of a similar nature, both on the day of surface treatment of both materials, and after 1, 3 and 6 months of storage. Free surface energy and work of adhesion also remain at the proper high level. It was found that with an increase in the time interval between the APP treatment and the gluing process, a decrease in the strength of the glued joint is observed.

**Keywords:** fiberglass, carbon fiber, peeling resistance, helicopter rotor blade, adhesive bond, atmospheric pressure plasma, adhesive shear, contact angle, free energy of the surface, storage time of treated surfaces

**For citation:** Barannikov A.A., Sudyin U.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. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-26-40.

## Введение

Разработка отечественных полимерных композиционных материалов (ПКМ) берет начало с конца 1930-х гг. – с разработки учеными ВИАМ так называемой «дельта-древесины», представляющей собой шпон карельской березы, пропитанный бакелитовым лаком [1]. При непосредственной поддержке видных научных деятелей А.Т. Туманова, С.Т. Кишкина, П.В. Дементьева и других с 1940-х гг. начинается бурное развитие ПКМ в ВИАМ и в стране в целом [2, 3]. В настоящее время результатом этого развития являются композиционные материалы нового поколения, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, которые находят все большее применение при создании современной отечественной гражданской и специальной авиационной техники (АТ), конкурентоспособной на мировом рынке [4–6]. При этом доля ПКМ в конструкции изделий АТ с каждым годом неуклонно растет (рис. 1).

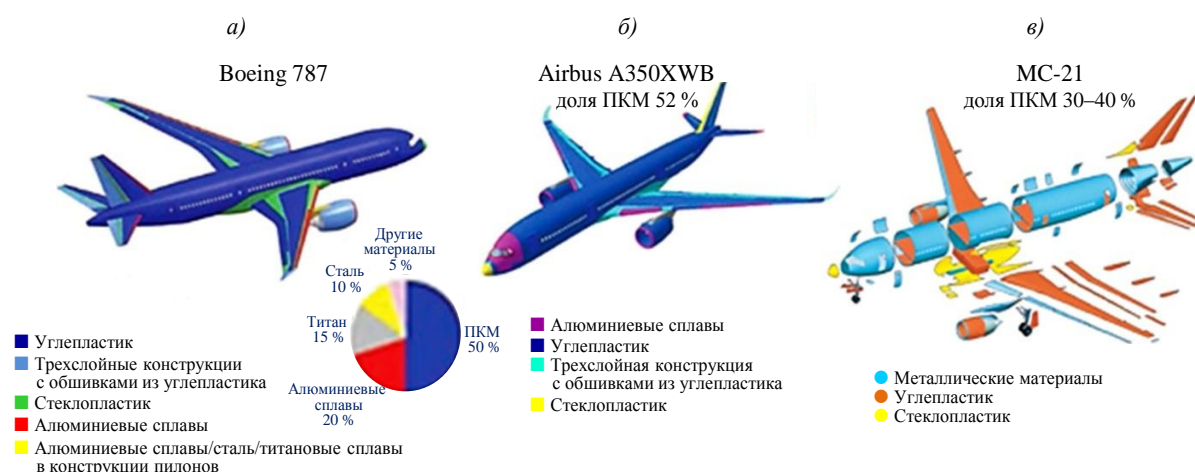


Рис. 1. Доля полимерных композиционных материалов в современной авиационной технике: а – Boeing 787 Dreamliner; б – Airbus A350XWB; в – MC-21

С увеличением доли ПКМ в АТ повышаются и требования к обеспечению ее надежности, которая определяет в конечном итоге также безопасность и экономическую эффективность авиационной техники. При этом в настоящее время достаточно большое количество элементов конструкции АТ из ПКМ изготавливают с применением клеевых соединений, обладающих рядом преимуществ перед традиционными способами соединения конструкций [7–12] в различных вариациях.

Многолетние исследования, проводимые в научном мировом сообществе, в том числе и в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, показали, что важнейшее значение в обеспечении надежности клеевого соединения материалов, включая и ПКМ, имеет подготовка их поверхности под склеивание. При этом одним из существенных показателей, определяющих эффективность того или иного способа, является допустимый интервал времени между подготовкой поверхности субстрата и самим процессом склеивания.

Как было отмечено ранее, в настоящее время в конструкциях современной отечественной АТ широко применяют клеевые препреги марок КМКС и КМКУ, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. В качестве способа подготовки поверхности конструкций на их основе под склеивание на авиационных предприятиях нашей страны широко используют механические способы – зашкуривание либо пескоструйную обработку. Но практика показывает, что в ряде случаев данные способы подготовки поверхности не обеспечивают требуемого значения прочности клеевого соединения, установленного нормативной документацией на изделие [11, 13–15]. В ходе проведения исследований, представленных в работах [11, 13–15], установлено, что композиционные материалы на основе клеевых препрегов имеют низкие адгезионные свойства при склеивании клеями «холодного» отверждения и что одним из вариантов решения данной проблемы является применение в настоящее время одного из перспективнейших способов подготовки поверхности ПКМ (рис. 2) – ее обработки плазмой атмосферного давления (низкотемпературная плазма) [13–33].

Однако в проведенных исследованиях не был установлен допустимый интервал времени хранения ПКМ на основе клеевых препрегов между обработкой их поверхности плазмой атмосферного давления и процессом склеивания.

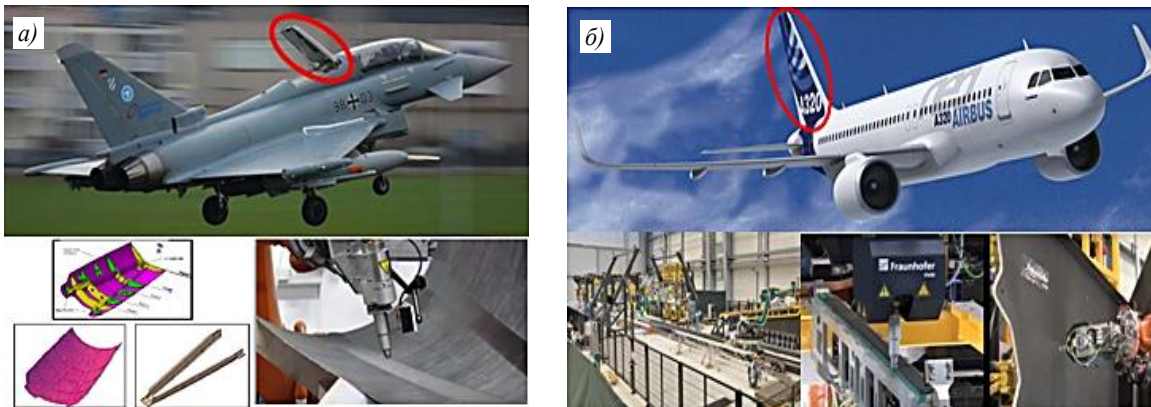


Рис. 2. Применение способа обработки поверхности плазмой атмосферного давления при изготовлении различных конструкций авиационной техники, выполненных из полимерных композиционных материалов: *а* – изготовление воздушного тормоза самолета Eurofighter Typhoon; *б* – сборка вертикального оперения самолета A320

Результаты исследований, проводимых учеными разных научно-исследовательских центров мира, по определению влияния плазмы атмосферного давления на свойства поверхности термопластичных материалов и ПКМ на основе непрерывных волокон и эпоксидных связующих показывают, что допустимый интервал времени их хранения между подготовкой поверхности субстрата и самим процессом склеивания составляет не менее 3 мес без ухудшения вновь приобретенных свойств поверхности субстрата [24–27, 31].

Цель данной работы – определение допустимого интервала времени хранения ПКМ на основе клеевых препрегов, разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, между обработкой поверхности плазмой атмосферного давления и процессом склеивания.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» [34] («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

### Материалы и методы

В исследованиях использовали следующие ПКМ: тонколистовой конструкционный стеклопластик марки ВПС-53К в соответствии с ТУ 1-595-25-1496–2015 (далее – стеклопластик) [35] и углепластик марки ВКУ-30К.УМТ49 в соответствии с ТУ 1-595-14-1304–2012 (далее – углепластик) [36]. В качестве адгезива применяли клей «холодного» отверждения марки ВК-27 в соответствии с ТУ 1-595-14-692–2008 (далее – адгезив) [37, 38]. Для установления допустимого интервала времени хранения стекло- и углепластика между обработкой поверхности низкотемпературной плазмой и процессом склеивания выбраны следующие критерии (методы) оценки поверхности склеиваемых материалов до и после обработки и прочности клеевых соединений «стеклопластик–адгезив–жесткая подложка» (стеклопластик марки СТ-69Н по ТУ 1-595-10-631-2001) и «углепластик–адгезив–углепластик»:

- прочность при сдвиге клеевого соединения внахлест по ГОСТ Р 57066–2016;
- сопротивление отслаиванию клеевого соединения по ГОСТ Р 57832–2017;
- краевой угол смачивания поверхности (КУС);
- характер разрушения клеевых соединений по ГОСТ Р 56977–2016.

Определение шероховатости поверхности склеиваемых материалов (формирование клеевого соединения – образца) до и после обработки плазмой проводили при помощи профилометра в направлении армирования [0°] и [90°].

Исследования микроструктуры поверхности склеиваемых материалов выполнены при помощи сканирующего электронного микроскопа.

Исследование смачиваемости (определение КУС), определение свободной энергии поверхности (СЭП) с ее составляющими и работы адгезии ( $W_a$ ) поверхности склеиваемых материалов до и после обработки плазмой проводили в определенной последовательности, по определенным режимам, с использованием тестовых жидкостей и на оборудовании, представленном в работах [13, 14]. Данные по обработке поверхности склеиваемых материалов, изготовлению образцов на их основе и проведению испытаний также изложены в указанных работах.

Образцы склеиваемых материалов с обработанными поверхностями закладывали на хранение в условиях категории 1 размещения изделий по ГОСТ 15150–69 в производственных условиях Ульяновского научно-технологического центра ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» сроком на 1, 3 и 6 мес с последующим исследованием их поверхностей, изготовлением образцов клеевых соединений и их испытаниями.

### Результаты и обсуждение

Исследования проводили с учетом результатов, полученных в работах, представленных ранее. В табл. 1 показаны результаты определения значения шероховатости по показателю  $R_a$  поверхности склеиваемых материалов до и после обработки плазмой.

Таблица 1

#### Результаты определения значения шероховатости по показателю $R_a$ поверхности склеиваемых материалов до и после обработки плазмой атмосферного давления (ПАД)

Продолжительность хранения после обработки ПАД, мес	Среднее значение шероховатости $R_a$ , мкм							
	стеклопластика				углепластика			
	в направлении армирования, градус							
	0		90		0		90	
	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки
В день обработки	9,87	10,85	7,11	6,38	0,27	0,31	0,28	0,32
1	8,90	9,40	10,70	9,00	0,21	0,25	0,22	0,24
3	9,63	10,20	8,70	7,23	0,22	0,25	0,24	0,29
6	7,95	8,36	8,13	7,65	0,26	0,31	0,25	0,30

Результаты исследования показывают, что шероховатость поверхности стеклопластика после ее обработки низкотемпературной плазмой увеличивается в направлении  $[0^\circ]$  и уменьшается в направлении  $[90^\circ]$ . Шероховатость поверхности углепластика увеличивается в обоих направлениях. Схожая картина сохраняется и спустя 1, 3 и 6 мес хранения у представленных материалов (рис. 3). Объяснения по данному факту представлены в работах [13, 14].

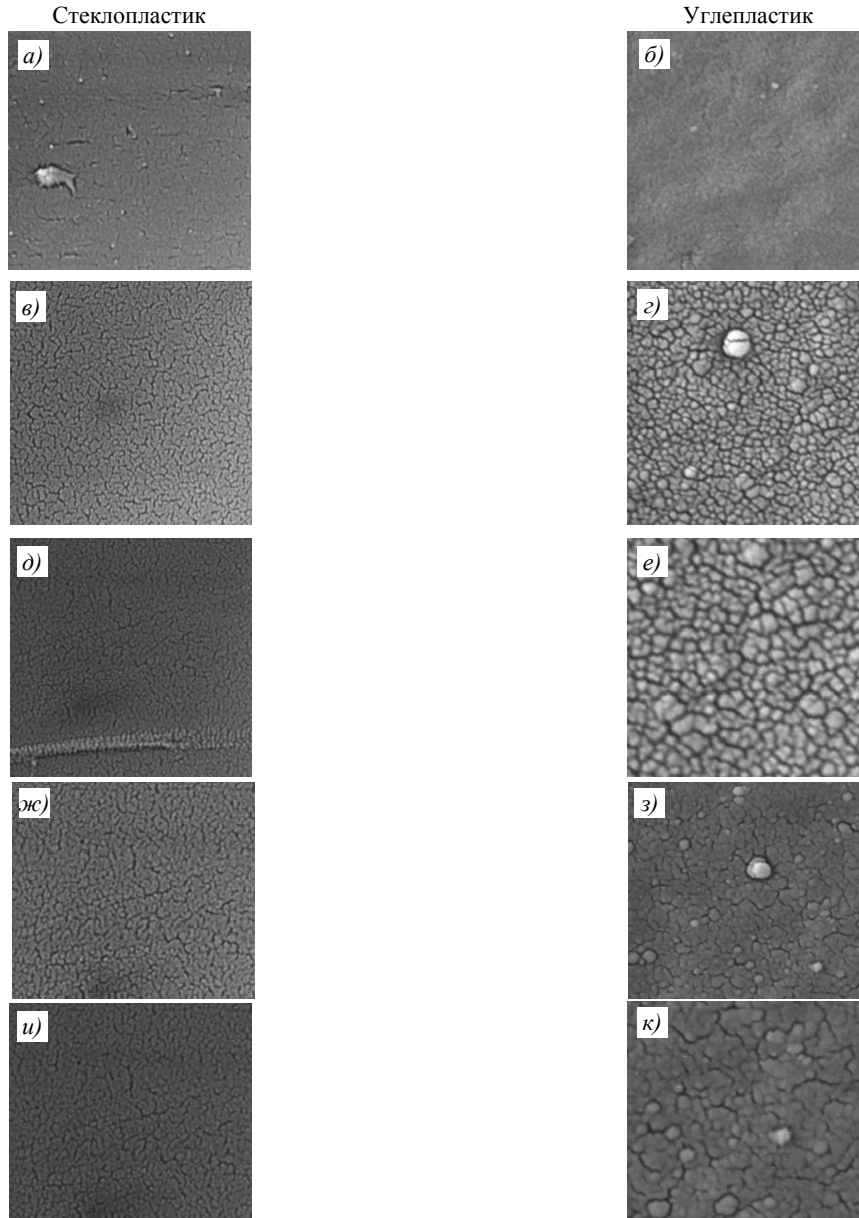


Рис. 3. Микроструктура поверхности стекло- и углепластика до (а, б) и после обработки плазмой атмосферного давления, в том числе в день обработки (в, г) и спустя 1 (д, е), 3 (ж, з) и 6 мес хранения (и, к)

Видно, что после обработки плазмой на поверхности склеиваемых материалов наблюдаются значительные изменения морфологии, указывающие на изменение шероховатости поверхности склеиваемых материалов на микроуровне, повышение которой способствует увеличению площади контакта и, как следствие, возрастанию

механического сцепления адгезива с поверхностью и повышению смачиваемости. Данные морфологические изменения наблюдаются и спустя 1, 3 и 6 мес хранения.

На рис. 4–6 представлены результаты исследования поверхности стекло- и углепластика до и после обработки плазмой, в том числе спустя 1, 3 и 6 мес хранения.

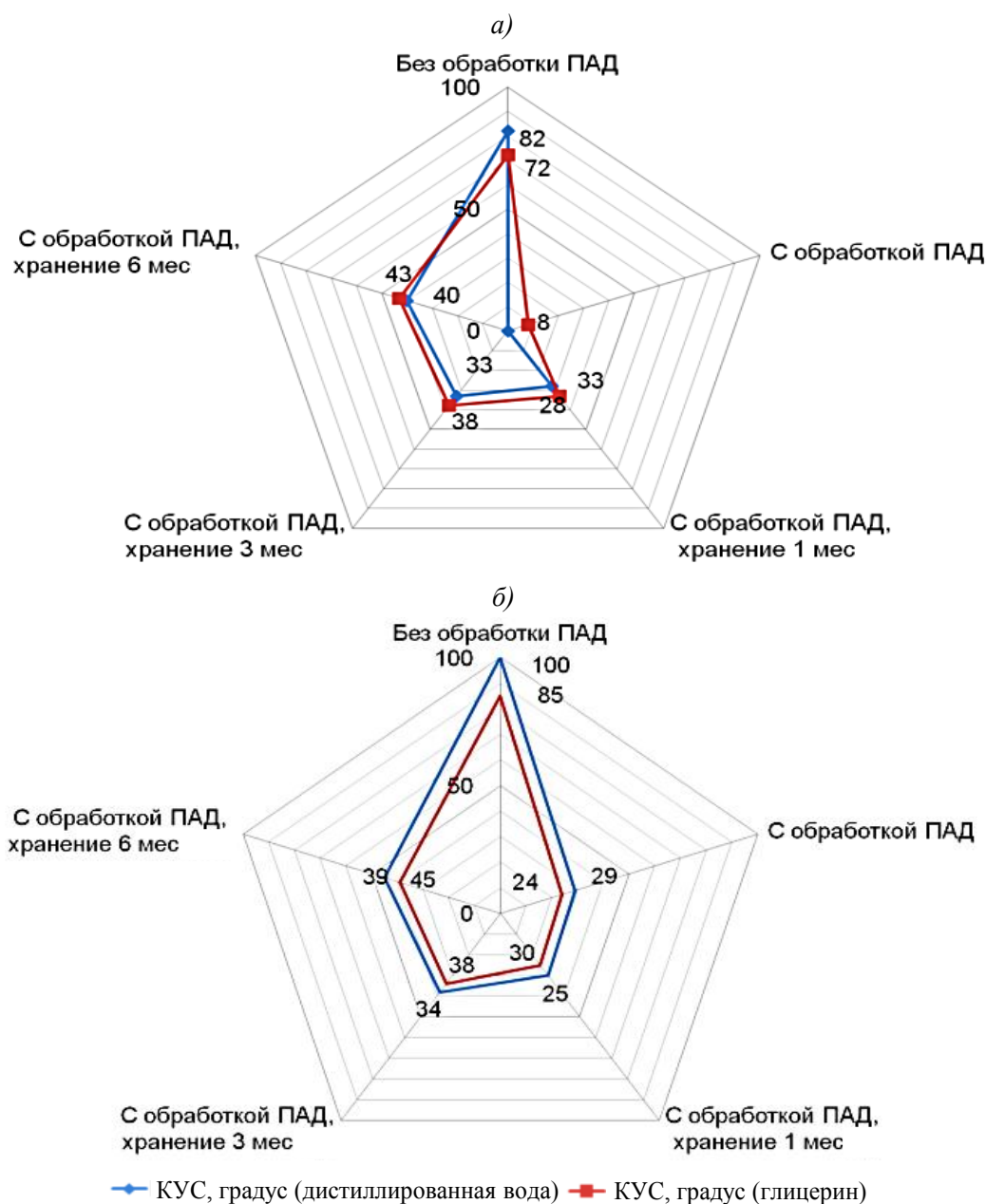


Рис. 4. Влияние обработки поверхности плазмой атмосферного давления (ПАД) и времени хранения на изменение краевого угла смачивания (КУС) поверхности стекло- (а) и углепластика (б)

Из результатов исследования, представленных на рис. 4–6, можно сделать вывод, что значение КУС при увеличении интервала времени хранения стекло- и углепластика между обработкой низкотемпературной плазмой и процессом склеивания повышается, а значения СЭП и  $W_a$  снижаются с течением времени:

- после хранения в течение 1 мес: СЭП снижается соответственно на 6 и 1 %;  $W_a$  – на 7 % или остается без изменений;
- после хранения в течение 3 мес: СЭП – на 9 %;  $W_a$  – на 10 и 4 %;
- после хранения в течение 6 мес: СЭП: – на 18 и 19 %;  $W_a$  – на 13 и 8 %.

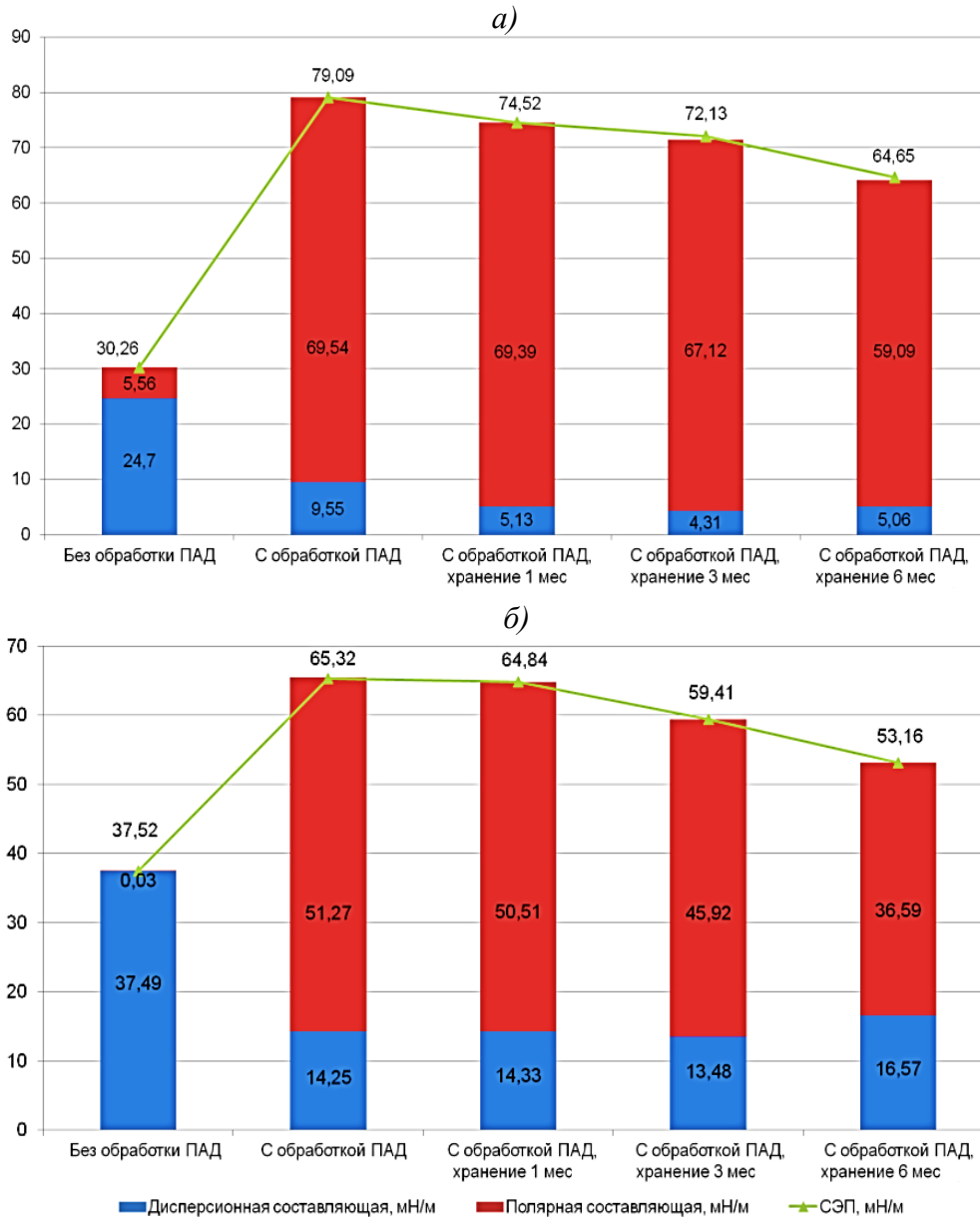


Рис. 5. Влияние обработки поверхности плазмой атмосферного давления (ПАД) и времени хранения на изменение свободной энергии поверхности (СЭП) и ее составляющих стекло- (а) и углепластика (б)

При этом значение полярной составляющей СЭП даже спустя 6 мес хранения находится на достаточно высоком уровне, способствуя сохранению гидрофильности поверхности склеиваемых материалов и характеризуя ее активность.

На рис. 7 представлены результаты влияния плазмы и времени хранения на изменение прочности образцов клеевых соединений «стеклопластик–адгезив–жесткая подложка» и «углепластик–адгезив–углепластик».

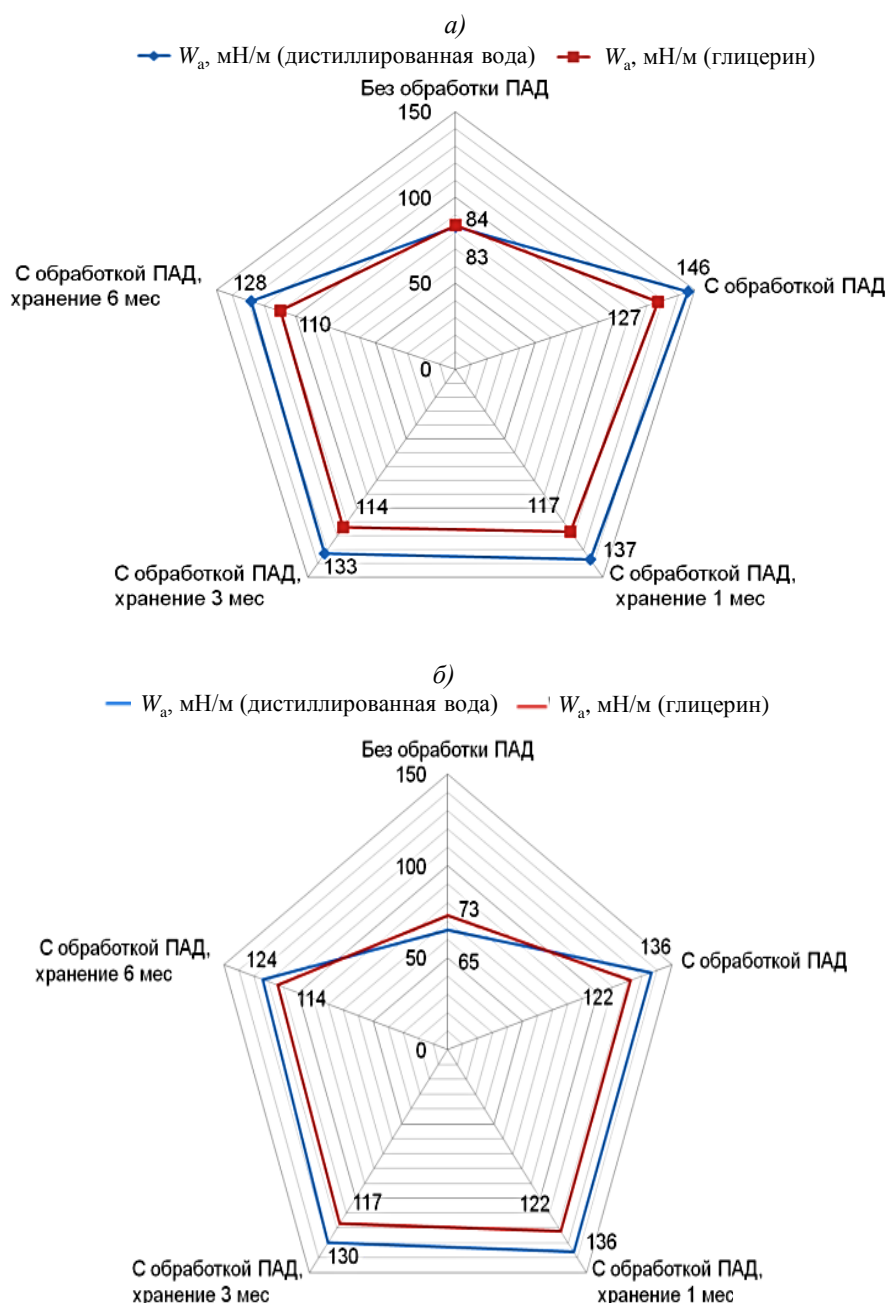


Рис. 6. Влияние обработки поверхности плазмой атмосферного давления (ПАД) и времени хранения на работу адгезии  $W_a$  поверхности стекло- (а) и углепластика (б)

Представленные на рис. 7 результаты свидетельствуют о том, что при увеличении интервала времени между обработкой низкотемпературной плазмой и процессом склеивания наблюдается снижение прочности клеевых соединений «стеклопластик–адгезив–жесткая подложка» и «углепластик–адгезив–углепластик». При проведении испытаний при температуре 20 °С прочность соединений после их хранения в течение 1 мес уменьшается на 16 и 6 %, после 3 мес – на 28 и 16 %, после 6 мес – на 28 и 17 % соответственно. При проведении испытаний при температуре 80 °С прочность соединений после их хранения в течение 1 мес снижается на 13 и 2 %, после 3 мес – на 13 и 12 %, после 6 мес – на 13 и 15 % соответственно.

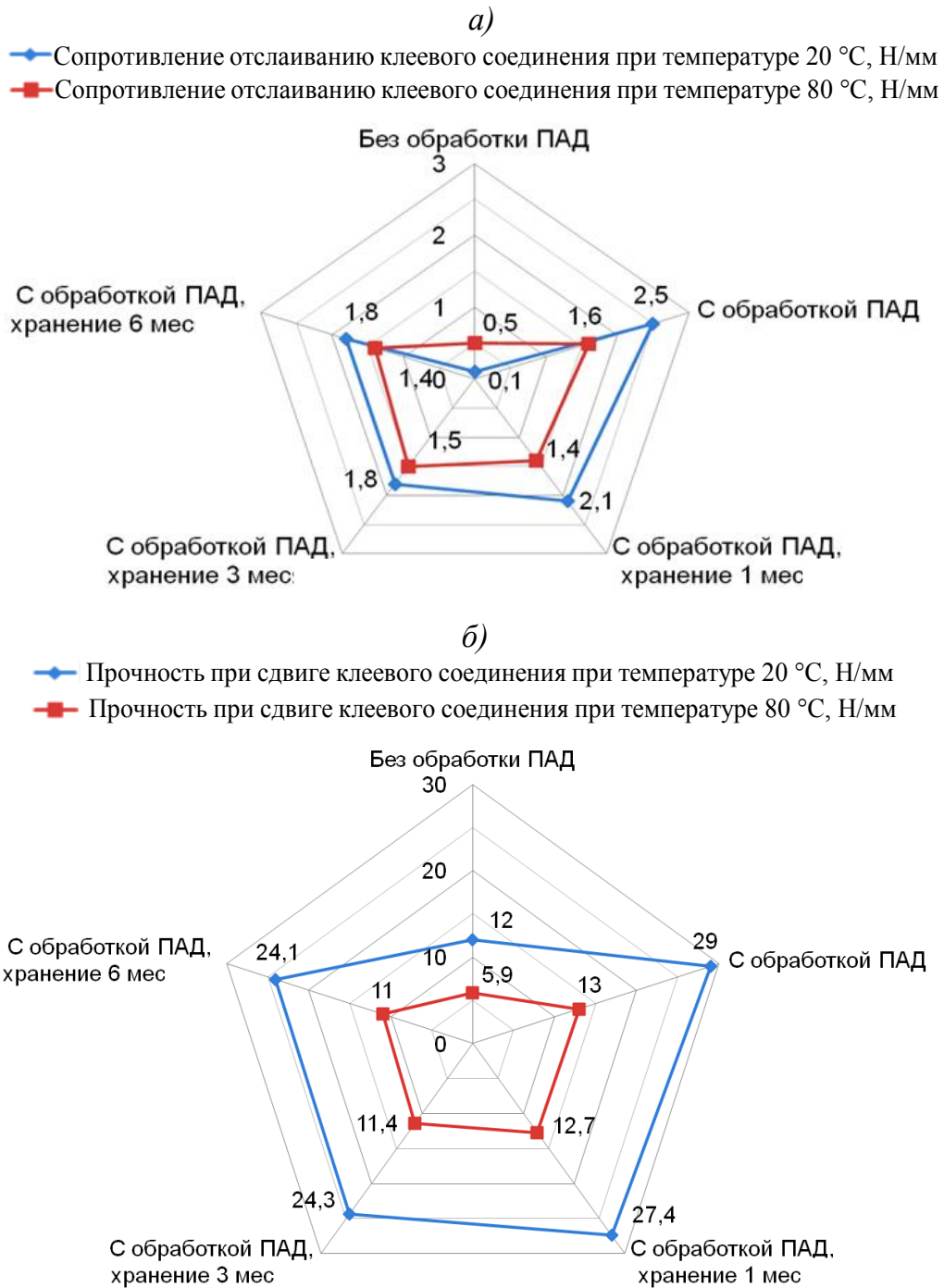












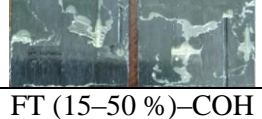

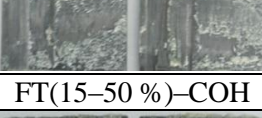

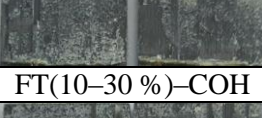

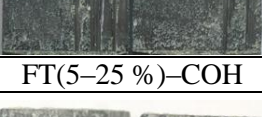



Рис. 7. Влияние обработки поверхности плазмой атмосферного давления (ПАД) и времени хранения на изменение прочности образцов клевых соединений «стеклопластик–адгезив–жесткая подложка» (а) и «углепластик–адгезив–углепластик» (б)

Выбор температуры механических испытаний при 80 °С обусловлен максимальной рабочей температурой адгезива.

Характер разрушения образцов клевых соединений на основе стекло- и углепластика с обработанной низкотемпературной плазмой поверхностью и после хранения в течение 1, 3 и 6 мес в основном сохраняет смешанный характер (табл. 2).

Таблица 2

Результаты изменения характера разрушения клеевых соединений «стеклопластик–адгезив–жесткая подложка» и «углепластик–адгезив–углепластик» до и после обработки плазмой атмосферного давления (ПАД) и времени их хранения

Тип материала	Состояние поверхности	Характер разрушений после механических испытаний при температуре, °С	
		20	80
Стеклопластик	До обработки ПАД	ADH	ADH
			
	После обработки ПАД (в день обработки)	LFT	COH
			
	После обработки ПАД и хранения в течение 1 мес	LFT	TLC
			
После обработки ПАД и хранения в течение 3 мес	LFT	TLC	
			
После обработки ПАД и хранения в течение 6 мес	LFT	TLC	
			
Углепластик	До обработки ПАД	ADH	ADH
			
	После обработки ПАД (в день обработки)	FT (15–50 %)–COH	COH
			
	После обработки ПАД и хранения в течение 1 мес	FT(15–50 %)–COH	COH
			
После обработки ПАД и хранения в течение 3 мес	FT(10–30 %)–COH	COH	
			
После обработки ПАД и хранения в течение 6 мес	FT(5–25 %)–COH	COH	
			

**Заключения**

Анализ полученных результатов в ходе проведения исследований по определению допустимого интервала времени хранения ПКМ на основе клеевых препрегов между обработкой поверхности плазмой атмосферного давления и процессом склеивания показал, что обработка низкотемпературной плазмой является наиболее эффективным способом подготовки поверхности материала под склеивание по сравнению с существующими способами подготовки поверхности под склеивание на авиационных предприятиях Российской Федерации. Установлено, что поверхность образцов склеиваемых ПКМ, обработанных плазмой, остается гидрофильной спустя 6 мес хранения в условиях категории 1 размещения изделий по ГОСТ 15150–69. Морфологические изменения носят схожий характер как в день обработки поверхности склеиваемых материалов, так и спустя 1, 3 и 6 мес хранения. Свободная энергия поверхности и работа адгезии также остаются на должном высоком уровне. Корреляционная зависимость, установленная в работах [29, 30], между изменением СЭП, работы адгезии и показателем прочности клеевых соединений сохраняется. При увеличении интервала времени между обработкой плазмой и процессом склеивания наблюдается снижение прочности клеевого соединения при испытаниях как при температуре 20 °С, так и при 80 °С.

Характер разрушения образцов клеевых соединений на основе стекло- и углепластика с обработанной поверхностью низкотемпературной плазмой и после хранения 1, 3 и 6 мес в основном смешанный.

В ходе выполнения работ установлено, что допустимый интервал времени хранения ПКМ на основе клеевых препрегов между обработкой их поверхности плазмой атмосферного давления и процессом склеивания составляет не более 6 мес. При этом проводятся дополнительные исследования по увеличению данного интервала до 12 мес.

**Список источников**

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. № 1. С. 36–39.
2. Каблов Е.Н. В истории ВИАМ Петр Дементьев занимает особое место // *Крылья Родины*. 2017. № 1. С. 1–2.
3. Каблов Е.Н., Петрова А.П., Нарский А.Р. Алексей Тихонович Туманов – основатель новых научных направлений в материаловедении. URL: <http://www.viam.ru/public> (дата обращения: 07.12.2021).
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // *Вестник РФФИ*. 2017. № 3. С. 97–105.
6. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. № 7–8. С. 54–58.
7. Вильнав Ж.Ж. Клеевые соединения. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
8. Кейгл Ч. Клеевые соединения / пер. с англ. В.П. Батизата, А.С. Богданова, И.М. Заманского, А.П. Петровой; под ред. Д.А. Кардашова. М.: Мир, 1971. 295 с.
9. *Composite materials handbook. US Department of Defense handbook*, 2002. Vol. 3: Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis. 734 p.
10. Peters S.T. *Handbook of Composites. Second Edition*. Chapman & Hall, 1998. 1120 p.
11. 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.
12. Богданова Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов: учеб. пособие. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 68 с.
13. 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: 12.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.

14. Баранников А.А., Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Куршев Е.В. Влияние плазмы атмосферного давления на прочность клеевого соединения на основе углепластика // Труды ВИАМ. 2021. № 12 (106). Ст. 06. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-47-54.
15. 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: 12.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-91-102.
16. 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: 12.11.2021).
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Hansen W. Plasma for Aviation and Aerospace Industries. URL: [https://www.plasmatrete.com/downloads/english/15-04\\_IST\\_aerospace.pdf](https://www.plasmatrete.com/downloads/english/15-04_IST_aerospace.pdf) (дата обращения: 12.07.2021).
22. 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.
23. 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.
24. 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).
25. 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/gleichhdiss.pdf](https://duepublico2.unidue.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico_derivate_00005593/gleichhdiss.pdf) (дата обращения: 12.11.2021).
26. 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: 12.11.2021).
27. 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: 12.11.2021).
28. 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.
29. 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.
30. 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.

31. 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: 12.11.2021).
32. Calomfirescu M., Neumaier R., Maier A. et al. Certification Concept and Development of a Bonded Eurofighter Airbrake Flight Demonstrator. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-AVT-266/MP-AVT-266-07.pdf> (дата обращения: 12.11.2021).
33. Gardiner G. The future of CFRP aerostructures assembly. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/the-future-of-cfrp-aerostructures-assembly> (дата обращения: 12.11.2021).
34. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ 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.
35. 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://viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-58-66.
36. Старков А.И., Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю. Разработка композиционного материала клеевого на основе альтернативного углеродного жгутового наполнителя марки УМТ49S-12К-EP и клеевого связующего марки ВСК-14-3 // *Труды ВИАМ*. 2020. № 6–7 (89). Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-62-71.
37. Шарова И.А. Отечественный и зарубежный опыт в области разработки эпоксидных клеев холодного отверждения // *Труды ВИАМ*. 2014. № 7. Ст. 05. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-5-5.
38. Исаев А.Ю., Павлюк Б.Ф., Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Балабанова О.С. Влияние модификации эпоксидных клеев холодного отверждения эластомерами на ресурсную прочность клеевых соединений // *Труды ВИАМ*. 2020. № 9 (91). Ст. 03. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-27-34.

#### References

1. Kablov E.N. Composites: today and tomorrow. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.
2. Kablov E.N. In the history of VIAM, Petr Dementiev occupies a special place. *Krylya Rodiny*, 2017, no. 1, pp. 1–2.
3. Kablov E.N., Petrova A.P., Narsky A.R. *Alexei Tikhonovich Tumanov is the founder of new scientific directions in materials science*. Available at: <http://www.viam.ru/public> (accessed: December 07, 2021).
4. 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.
5. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
6. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
7. Vilnave Zh.Zh. *Adhesive connections*. Moscow: Technosfera, 2007, 384 p.
8. Cagle Ch. *Adhesive connections*. Ed. Kardashov D.A. Moscow: Mir, 1971, 295 p.
9. *Composite materials handbook*. Vol. 3: Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis. US Department of Defense handbook, 2002, 734 p.
10. Peters S.T. *Handbook of Composites*. Second Ed. Chapman & Hall, 1998, 1120 p.
11. 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.
12. Bogdanova Yu.G. *Adhesion and its role in ensuring the strength of polymer composites: textbook*. allowance. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2010, 68 p.

13. 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: November 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.
14. Barannikov A.A., Satdinov R.A., Veshkin E.A., Kurshev E.V. The effect of atmospheric pressure plasma on the strength of an adhesive bond based on CFPR. *Trudy VIAM*, 2021, no. 12 (106), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: 12 January, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-47-54.
15. Barannikov A.A., Postnova M.V., Krashennnikova 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: 12 January, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-91-102.
16. 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, 2021).
17. 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.
18. 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.
19. 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, pp. 142–149. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2019.03.010.
20. 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.
21. Hansen W. *Plasma for Aviation and Aerospace Industries*. Available at: [https://www.plasmatreat.com/downloads/english/15-04\\_IST\\_aerospace.pdf](https://www.plasmatreat.com/downloads/english/15-04_IST_aerospace.pdf) (accessed: July 12, 2021).
22. 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.
23. 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.
24. 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](https://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/11379/1/Thesis_June%202011%20JSS-SLU-AUF_v5.pdf) (accessed: July 12, 2021).
25. Gleich H. *Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie*: dis. Universität Duisburg-Essen, 2004, 103 p. Available at: [https://duepublico2.unidue.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico\\_derivate\\_00005593/gleichdiss.pdf](https://duepublico2.unidue.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico_derivate_00005593/gleichdiss.pdf) (accessed: July 12, 2021).
26. 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: November 12, 2021).
27. 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](https://szie.hu/sites/default/files/hayder_lateef_dissertation.pdf) (accessed: November 12, 2021).
28. 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.

29. Kostova K.G., Nishimeia 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.
30. 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.
31. 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](http://tesi.cab.unipd.it/48832/1/Tesi_ANTONELLO_Julien.pdf) (accessed: November 12, 2021).
32. Calomfirescu M., Neumaier R., Maier A. et al. *Certification Concept and Development of a Bonded Eurofighter Airbrake Flight Demonstrator*. Available at: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-AVT-266/MP-AVT-266-07.pdf> (accessed: November 12, 2021).
33. Gardiner G. *The future of CFRP aerostructures assembly*. Available at: <https://www.compositesworld.com/articles/the-future-of-cfrp-aerostructures-assembly> (accessed: November 12, 2021).
34. 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.
35. Lukina N.F., Dementeva L.A., Petrova A.P., Anihovskaya L.I. Gluing materials in the design of blades of helicopters. *Trudy VIAM*, 2016, no. 7, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-7-7.
36. Starkov A.I., Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu. Development of adhesive composite material based on UMT49S-12K-EP alternative carbon filler and VSK-14-3 adhesive binder. *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-62-71.
37. Sharova I. A. Domestic and foreign experience in area of cold curing epoxy adhesive development. *Trudy VIAM*, 2014, no. 7, paper no. 05. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: November 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-5-5.
38. Isaev A.Yu., Pavlyuk B.Ph., Petrova A.P., Lukina N.Ph., Balabanova O.S. Effect of modification of cold cured epoxy adhesives with elastomers on the resource strength of adhesive joint. *Trudy VIAM*, 2020, no. 9 (91), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-27-34.

**Информация об авторах**

**Баранников Александр Александрович**, инженер-технолог 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Судьин Юрий Иванович**, инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Вешкин Евгений Алексеевич**, начальник УНТЦ, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Сатдинов Руслан Амиржанович**, заместитель начальника УНТЦ по производству, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Alexander A. Barannikov**, First category engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Yuri I. Sudyin**, Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

**Ruslan A. Satdinov**, Deputy Head of USTC for production, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 03.02.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.02.2022.

The article was submitted 03.02.2022; approved and accepted for publication after reviewing 10.02.2022.