

УДК 621.792.053

*А.А. Баранников<sup>1</sup>, Р.А. Сатдинов<sup>1</sup>, Е.А. Вешкин<sup>1</sup>, Е.В. Куршев<sup>1</sup>***ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ОСНОВЕ УГЛЕПЛАСТИКА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-47-54

*Представлены результаты исследования поверхности углепластика марки ВКУ-30К.УМТ49 без ее обработки и с обработкой плазмой атмосферного давления (ПАД), являющейся одним из передовых способов подготовки поверхности под различные адгезионные процессы на основании изучения явления смачивания и теории адгезии. Получены результаты влияния ПАД на прочность клеевого соединения на основе углепластика марки ВКУ-30К.УМТ49, шероховатость поверхности углепластика и ее микроструктуру, а также результаты свободной энергии поверхности и ее составляющих и работы адгезии по методу Оуэнса–Вендта–Рабеля–Кьельбле.*

**Ключевые слова:** адгезия, краевой угол смачивания, свободная энергия поверхности, работа адгезии, углепластик, прочность клеевого соединения.

*A.A. Barannikov<sup>1</sup>, R.A. Satdinov<sup>1</sup>, E.A. Veshkin<sup>1</sup>, E.V. Kurshev<sup>1</sup>***THE EFFECT OF ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA ON THE STRENGTH OF AN ADHESIVE BOND BASED ON CFPR**

*The article notes the results of studying the surface of VKU-30K.UMT49 carbon fiber-reinforced plastic without and with its treatment with atmospheric pressure plasma (APP), which is one of the most advanced methods of surface preparation for various adhesion processes, based on the study of the phenomenon of wetting and the theory of adhesion. The results of the effect of APP on the strength of an adhesive bond based on VKU-30K.UMT49 carbon fiber-reinforced plastic, the roughness of the surface of the carbon fiber and its microstructure, the results of the free energy of the surface and its components and the work of adhesion according to the method of Owens–Wendt–Rabel–Kaelble were obtained.*

**Keywords:** adhesion, contact angle, surface free energy, work of adhesion, carbon fiber reinforced plastic, adhesive shear.

<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**

Как показывает история, независимость любой страны мира напрямую зависит от степени развития ее промышленности, которая взаимосвязана с технологической суверенностью научно-исследовательских и производственных центров. Обеспечение такого суверенитета с одновременным поддержанием высокого уровня конкурентоспособности высокотехнологичной продукции различного назначения невозможно без применения современных материалов, в том числе и полимерно-композиционных (ПКМ) [1–4].

В современном промышленном производстве ПКМ, бесспорно, являются наиболее востребованным продуктом [5]. Одним из главных локомотивов внедрения и совершенствования ПКМ во всем мире является авиация. В настоящее время не существует ни одного современного летательного аппарата, в конструкции которого не использовались бы ПКМ различного назначения [6]. Во Всероссийском научно-

исследовательском институте авиационных материалов за весь период его функционирования разработано более двух десятков ПКМ, находящихся на уровне зарубежных аналогов или превосходящих их по некоторым показателям, для различных отраслей промышленности [7]. Наиболее востребованными современными ПКМ, разработанными в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, являются углепластики на основе эпоксидных и цианэфирных связующих [7, 8].

Углепластики нашли широкое применение в авиационной отрасли в качестве материалов для изготовления не только средне- и малонагруженных конструкций (детали и элементы механизация крыла и хвостового оперения, мотогондолы двигателей, разного рода обтекатели и др.), но также силовых и особо ответственных конструкций крыла и фюзеляжа благодаря высоким показателям удельной прочности и жесткости. Как правило, такие конструкции в настоящее время стараются изготавливать по интегральной схеме, представляющей собой сборку технологического пакета (слоев препрега или слоев сухого армирующего наполнителя и клея), и за одну технологическую операцию. Это дает возможность существенно снизить массу конструкции и одновременно повысить показатели ее жесткости, прочности и технологичности. Однако остается большое количество деталей авиационной техники, которые изготавливают и в большинстве случаев ремонтируют по раздельной схеме. Раздельная (традиционная) схема изготовления деталей из ПКМ, как правило, представляет собой склеивание отдельных элементов конструкции между собой различными видами клеев. Данная схема предъявляет высокие требования к подготовке склеиваемых поверхностей, поскольку качество подготовки поверхности является одним из основных факторов, определяющих прочность клеевых соединений и их эксплуатационную надежность во всех климатических условиях.

Ранее в работах [9, 10] отмечено, что:

- обеспечение оптимальной прочности поверхности ПКМ зависит не только от выбранного адгезива, но и от качества подготовки его поверхности;
- выбор способа подготовки поверхности зависит не только от выбранного адгезива и свойств склеиваемых элементов конструкции, но также от требований к прочности клеевого соединения, условиям эксплуатации, технико-экономическим возможностям того или иного предприятия;
- свойства поверхностного слоя композиционного материала зависят от «предыстории» склеиваемых элементов конструкции и обычно в полной мере неизвестны;
- традиционная подготовка поверхности композитов под склеивание включает обезжиривание, зашкуривание, дробеструйную обработку и применение «жертвенных» слоев;
- традиционные методы подготовки в ряде случаев оказываются неэффективными при изготовлении деталей из ПКМ на основе различных армирующих наполнителей, где в качестве полимерной матрицы используют клеевое связующее. Установлено, что данный класс материалов обладает низкими показателями адгезии к клеям «холодного» отверждения;
- обработка поверхностей плазмой атмосферного давления (ПАД) в настоящее время является одним из перспективных и экологически чистых методов подготовки поверхности под склеивание;
- после воздействия ПАД увеличивается прочность адгезионного соединения на основе углепластика, где в качестве полимерной матрицы используется клеевое связующее;
- воздействие ПАД способствует повышению показателей энергетических характеристик поверхности ПКМ, коррелируя с увеличением прочности адгезионного соединения на его основе.

На основании изложенного можно заключить, что целью работы является установление влияния ПАД на прочность адгезионного соединения на основе углепластика и клея «холодного» отверждения. Для этого поверхность углепластика исследуют на

макро- и микроуровне до и после воздействия ПАД, а также определяют ее краевой угол смачивания (КУС), свободную энергию поверхности (СЭП) углепластика и ее компонентов, работу адгезии поверхности и прочность адгезионного соединения до и после воздействия ПАД.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [11].

### Материалы и методы

При проведении эксперимента использовали углепластик ВКУ-30К.УМТ49 в соответствии с ТУ 1-595-14-1304–2012 и клей ВК-27 в соответствии с ТУ 1-595-14-692–2008.

Углепластик представляет собой пластины габаритным размером  $(100\pm 3)\times(25\pm 1)\times(2\pm 0,2)$  мм, полученные путем вырезания из плиты, изготовленной методом вакуум-автоклавного формования в соответствии с ТИ 1-595-11-762–2015. При этом после формования у углепластика верхняя и нижняя поверхности становятся глянцевыми в результате оттиска от цулаг. В качестве цулаг использовали листы толщиной от 1 до 1,5 мм из нержавеющей стали с зеркальной глянцевой поверхностью с обеих сторон. Поверхности цулаг непосредственно перед использованием обрабатывали разделительной жидкостью.

Исследована шероховатость поверхности углепластика, подлежащей склеиванию, до и после воздействия ПАД, а также снимки ее микроструктуры, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа. Шероховатость определяли профилометром во взаимно перпендикулярных направлениях.

Определение КУС, СЭП с ее составляющими и работы адгезии поверхности углепластика, подлежащей склеиванию, без обработки и с обработкой ПАД проводили при помощи автоматизированного гониометра в соответствии с СТО 1-595-7-593–2019 и методом Оуэнса–Вендта–Рабеля–Кьельбле (ОВРК). В качестве жидкостей для определения КУС использовали дистиллированную воду (жидкость 1) и глицерин (жидкость 2). Измерения проводили при температуре  $20\pm 3$  °С. Влажность составляла  $55\pm 5$  %. Дозирование жидкостей выполняли автоматизированно со скоростью 0,5 мл/с. Размер капли жидкостей составлял 3 мкл.

В табл. 1 представлены значения поверхностного натяжения тестовых жидкостей ( $\gamma_{LV}$ ) при температуре 20 °С и компонентов, обусловленных дисперсионными и полярными межмолекулярными взаимодействиями ( $\gamma_{LV}^d$  и  $\gamma_{LV}^p$  соответственно) в объеме жидких фаз для метода ОВРК, взятых из базы данных программного обеспечения.

Таблица 1

**Значения поверхностного натяжения тестовых жидкостей при температуре 20 °С и компонентов, обусловленных дисперсионными и полярными межмолекулярными взаимодействиями в объеме жидких фаз для метода Оуэнса–Вендта–Рабеля–Кьельбле**

Тестовая жидкость	$\gamma_{LV}$	$\gamma_{LV}^d$	$\gamma_{LV}^p$	Примечание
	мН/м			
1	72,8	26	46,8	По Gebhardt
2	64	34	30	По Van Oss et al.

Воздействие на поверхность углепластика ПАД проводили генератором ПАД, установленным на установке портального типа, с возможностью перемещения по осям X, Y, Z, по режиму, указанному в работе [9]. Образцы для испытаний получали путем склеивания внахлест клеем ВК-27 пластин из углепластика после воздействия ПАД (в соответствии с ГОСТ Р 57066–2016). Склеивание производили в электрической печи при температуре  $60\pm 5$  °С и давлении  $0,100\pm 0,005$  МПа, которое обеспечивали с помощью

приспособления для склеивания образцов (рис. 1), в течение 1 ч. Охлаждение проводили до температуры окружающей среды, без снятия давления. Прочность адгезионного соединения на основе углепластика вычисляли методом определения прочности при сдвиге по ГОСТ Р 57066–2016.

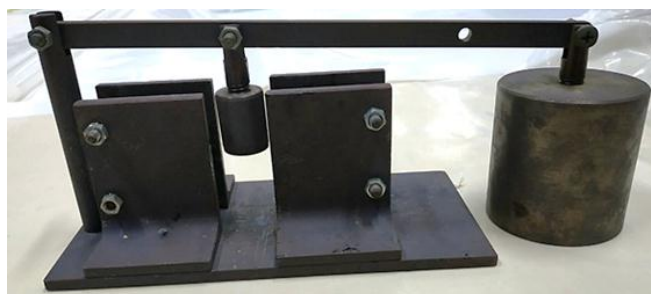


Рис. 1. Общий вид рычажного приспособления для склеивания образцов для определения прочности при сдвиге клеевого соединения

### Результаты и обсуждение

В табл. 2 представлены результаты измерения шероховатости поверхности, подлежащей склеиванию, до и после воздействия ПАД.

Таблица 2

**Результаты измерения шероховатости поверхности углепластика ВКУ-30К.УМТ49, подлежащей склеиванию в разных направлениях, без обработки и с обработкой ПАД**

Состояние поверхности	Направление склеивания	Значения шероховатости, мкм
Без обработки ПАД	[0°]	0,27
	[90°]	0,28
С обработкой ПАД	[0°]	0,31
	[90°]	0,32

Результаты измерения показывают, что шероховатость после воздействия ПАД увеличивается на 15 % в обоих взаимно перпендикулярных направлениях. По-видимому, объяснение этому кроется в самом процессе плазменной обработки. В работе [12] отмечено, что в момент прохождения плазмы по поверхности углепластика происходит ее очистка за счет ионной бомбардировки поверхности. Одновременно с этим повышается значение шероховатости поверхности на 5–30 мкм – в зависимости от ее химического состава, что подтверждается результатами, полученными в работах [9, 10, 12–28], и происходят ее травление и активация. Данные предположения подтверждаются также снимками микроструктуры поверхности углепластика (рис. 2).

Поверхность углепластика без обработки ПАД имеет однородную волнообразную структуру с незначительными включениями (рис. 2, а, в). При увеличении  $\times 100000$  (рис. 2, в) видно, что поверхность относительно гладкая, эрозии не наблюдается. Поверхность углепластика после воздействия ПАД имеет однородную волнообразную структуру, как и без обработки (рис. 2, а), однако волнообразность проявляется более четко (рис. 2, б). Ярко выраженные морфологические изменения наблюдаются на поверхности, обработанной ПАД, полимерной матрицы при увеличении  $\times 100000$  (рис. 2, г). Данные изменения указывают на повышение шероховатости поверхности углепластика на микроуровне, что способствует возрастанию ее смачиваемости и механическому сцеплению адгезива с ней благодаря увеличению площади контакта.

Выявлено также, что поверхность углепластика, не обработанная ПАД, является гидрофобной. Об этом свидетельствуют полученные значения КУС (табл. 3) и показатель дисперсионной составляющей СЭП: чем он больше, тем поверхность более

гидрофобна (табл. 4). Замечено, что на поверхности углепластика, не обработанной ПАД, дисперсионная составляющая СЭП значительно больше полярной.

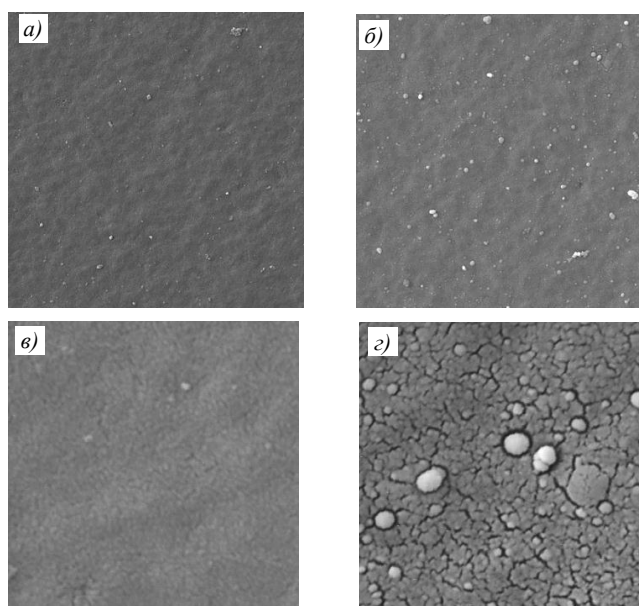


Рис. 2. Микроструктуры поверхности углепластика без обработки (*a* –  $\times 20000$ ; *c* –  $\times 100000$ ) и с обработкой ПАД (*b* –  $\times 20000$ ; *d* –  $\times 100000$ )

Таблица 3

**Результаты измерений краевого угла смачивания (КУС) тестовых жидкостей на поверхности углепластика ВКУ-30К.УМТ49, подлежащей склеиванию, без обработки и с обработкой ПАД**

Тестовая жидкость	Значения КУС*, градус, при состоянии поверхности	
	без обработки ПАД	с обработкой ПАД
1	$\frac{95-105}{100}$	$\frac{21-39}{29}$
2	$\frac{82-87}{85}$	$\frac{15-29}{24}$

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

Таблица 4

**Результаты расчета свободной энергии поверхности углепластика, подлежащей склеиванию, без обработки и с обработкой ПАД с коэффициентом корреляции 1**

Состояние поверхности	$\gamma_{LV}$	$\gamma_{LV}^d$	$\gamma_{LV}^p$
	мН/м		
Без обработки ПАД	37,52	37,49	0,03
С обработкой ПАД	65,32	14,25	51,27

В результате плазменной обработки поверхность углепластика становится гидрофильной. Данное воздействие уменьшает КУС (табл. 3) и приводит к увеличению СЭП и работы адгезии  $W_a$  (табл. 4 и 5).

Сравнивая значения СЭП и работы адгезии без обработки и с обработкой ПАД, можно увидеть, что СЭП увеличилась в 1,7 раза, а  $W_a$  – в  $\sim 1,9$  раза. Полярная составляющая СЭП после плазменной обработки преобладает над дисперсионной составляющей. На основании результатов зарубежных исследований по данной тематике [12]

можно сделать вывод, что увеличение полярной составляющей СЭП после ее обработки может быть вызвано образованием на ней новых кислородсодержащих функциональных групп (карбокислых и карбонильных), которое способствует увеличению смачиваемости поверхности, поскольку карбонильные и карбокислые группы могут вступать во взаимодействие с основной углеводородной цепью, образуя места для взаимодействия с различными полимерными матрицами.

Таблица 5

**Результаты расчета работы адгезии поверхности углепластика, подлежащей склеиванию, без обработки и с обработкой ПАД**

Состояние поверхности	Тестовая жидкость	$W_a$ , мН/м
Без обработки ПАД	1	65
	2	73
С обработкой ПАД	1	136
	2	122

После изготовления образцов проведены их механические испытания в соответствии с ГОСТ Р 57066–2016 при температурах 20 и 80 °С, результаты которых представлены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

**Результаты механических испытаний образцов клеевого соединения на основе углепластика с использованием клея ВК-27 на прочность при сдвиге**

Состояние поверхности	Прочность при сдвиге*, МПа, при температуре, °С	
	20	80
Без обработки ПАД	11,00–14,00 12,20	4,90–6,70 5,90
	26,9–32,1 29,0	10,7–16,3 13,1

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

Таблица 7

**Наиболее распространенный характер разрушения образцов клеевого соединения на основе углепластика**

Состояние поверхности	Вид образцов после испытаний при температуре, °С	
	20	80
Без обработки ПАД	при типе разрушения	
	ADH	ADH
С обработкой ПАД	FT (15–50 %)–COH	COH
		

Результаты испытаний показали, что характер разрушения образцов клеевых соединений на основе углепластика без обработки ПАД носит преимущественно адгезионный характер. Это можно объяснить недостаточным количеством функциональных групп (табл. 4), наличием загрязняющих элементов и отсутствием развитой морфологии поверхности на микроуровне (рис. 2, в). После воздействия ПАД прочность адгезионного соединения увеличилась в 2,4 раза при температуре 20 °С и в 2,2 раза при

температуре 80 °С. Результатом обработки ПАД стало изменение характера разрушения образцов адгезионного соединения с типом разрушения АДН на преимущественно смешанный характер разрушения (FT–СОН) при температуре 20 °С и с различным процентным соотношением разрушений FT и СОН при температуре 80 °С.

Результаты испытаний, представленные в табл. 5 и 6, коррелируют между собой – в обоих случаях необходимо затратить больше усилий для разделения контактирующих фаз.

### Заключения

Исследована поверхность углепластика марки ВКУ-30К.УМТ49 как до обработки, так и после обработки ПАД. Анализ результатов исследований показал, что плазменная обработка снижает КУС, что свидетельствует об улучшении смачиваемости поверхности углепластика. Одновременно с этим повышается ее шероховатость в обоих взаимно перпендикулярных направлениях, что обусловлено самим процессом воздействия ПАД.

Выявлено, что под влиянием плазмы СЭП углепластика увеличивается. При этом происходит перераспределение компонентов СЭП, полярная составляющая в несколько раз превышает дисперсионную.

Обнаружено также, что обработка ПАД влияет на увеличение работы адгезии. Установлено, что ее возрастание коррелирует с повышением значения прочности при сдвиге клеевого соединения «углепластик–клей ВК-27–углепластик».

Таким образом, можно сделать вывод, что воздействие плазмы на поверхность углепластика оказывает положительное влияние, в результате которого прочность при сдвиге клеевого соединения на его основе возрастает в несколько раз. На основании полученных результатов исследования и результатов, представленных в работе [10], возникает вопрос о необходимости проведения дополнительных исследований по оценке влияния временного разрыва между обработкой поверхности ПКМ плазмой и операцией склеивания на прочность клеевого соединения.

### Библиографический список

1. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // *Инновации*. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
2. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for their Digital Processing // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. № 7–8. С. 54–58.
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. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект & Технологии*. 2016. № 2. С. 41–46.
6. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
7. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
8. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Усачева М.Н., Пурвин К.Э. Технологические особенности изготовления толстостенных деталей из ПКМ (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (87). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-61-67.
9. Баранников А.А., Постнов В.И., Вешкин Е.А., Стрельников С.В. О роли подготовки поверхности стеклопластика под склеивание // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2019. № 6. С. 19–27.
10. 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: 04.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.

11. 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.
12. Williams T.S., Yu H., Hicks R.F. 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.
13. 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: 04.04.2021).
14. 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. 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).
15. 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).
16. 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).
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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).
21. 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.
22. Богданова Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов: учеб. пособие. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 68 с.
23. Краус Э. Повышение прочности клеевых соединений полимерных материалов путем лазерной и плазменной обработки поверхности: дис. ... канд. техн. наук. Казань: КНИТУ, 2017. 184 с. URL: <http://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=146076> (дата обращения: 04.04.2021).
24. Данченко Ю.М. Регулирование свободной поверхностной энергии эпоксидных полимерных материалов с использованием минеральных наполнителей // *Полимерные материалы и технологии*. 2017. Т. 3. № 2. С. 56–63.
25. 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.
26. 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: 15.04.2021).
27. Thomsen F. Practical Contact Angle Measurement (5). Custom – made models: from contact angle to surface free energy. URL: [https://warwick.ac.uk/fac/cross\\_fac/sciencecity/programmes/internal/themes/am2/booking/dropshapeanalyser/practical\\_contact\\_angle\\_measurement\\_5.pdf](https://warwick.ac.uk/fac/cross_fac/sciencecity/programmes/internal/themes/am2/booking/dropshapeanalyser/practical_contact_angle_measurement_5.pdf) (дата обращения: 15.04.2021).
28. 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.