

Научная статья

УДК 665.939

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5- 61-75

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД СКЛЕИВАНИЕ КЛЕЯМИ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

И.М. Дубровин¹, М.Ф. Лопатина¹, А.Ю. Исаев¹, А.И. Старков¹

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

Аннотация. Приведены примеры практического применения современных способов обработки поверхности различных материалов под склеивание: использование жертвенного слоя при формировании композитов, пескоструйный, плазменный методы и др. Подготовка поверхности способствует повышению прочности клеевых соединений из металлических и полимерных композиционных материалов в конструкции изделий авиационной техники. Изложены результаты отечественных и зарубежных исследований, направленных на разработку перспективных технологий подготовки поверхности полимерных композиционных материалов под склеивание.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, методы подготовки поверхности, клей, клеевое соединение, углепластик, стеклопластик

Для цитирования: Дубровин И.М., Лопатина М.Ф., Исаев А.Ю., Старков А.И. Современные и перспективные способы подготовки поверхности металлов и полимерных композиционных материалов под склеивание клеями авиационного назначения // Труды ВИАМ. 2025. № 5 (147). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-61-75.

Scientific article

MODERN AND PROSPECTIVE METHODS FOR PREPARING METAL AND POLYMER COMPOSITE SURFACES FOR BONDING WITH AVIATION-GRADE ADHESIVES

I.M. Dubrovin¹, M.F. Lopatina¹, A.Yu. Isaev¹, A.I. Starkov¹

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 provides examples of the practical application of modern surface treatment methods for bonding, such as the use of a sacrificial layer during formation of polymer composite materials, sandblasting, plasma treatment, and other methods that contribute to enhancing strength of adhesive joints made of metallic materials and polymer composite materials in aircraft structures. The results of domestic and foreign researches aimed at developing advanced technologies for polymer composite materials surface preparation for bonding are presented.

Keywords: polymer composite material, surface preparation methods, adhesive, adhesive bonding, carbon fiber, fiberglass

For citation: Dubrovin I.M., Lopatina M.F., Isaev A.Yu., Starkov A.I. Modern and prospective methods for preparing metal and polymer composite surfaces for bonding with aviation-grade adhesives. *Trudy VIAM*, 2025, no. 5 (147), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-61-75.

Введение

Современные технологии позволяют соединять материалы различными способами. Одним из наиболее эффективных методов получения соединений, которые используются в различных отраслях техники, является склеивание [1]. Путем склеивания материалов получают прочные и долговечные соединения, которые могут выдержать воздействие механических нагрузок и эксплуатационных факторов, в том числе климатических [2].

Одним из наиболее ответственных этапов технологического процесса склеивания является подготовка склеиваемых поверхностей, так как от их чистоты и структуры напрямую зависит уровень адгезионных свойств клея и прочностных характеристик клеевых соединений [3–5].

Существуют различные методы подготовки поверхности металлических и неметаллических материалов под склеивание, с помощью которых удаляются слабые поверхностные слои, обеспечиваются смачивание клеем и максимальное физико-химическое взаимодействие на границе «адгезив–субстрат». Методы делятся на три группы: физические (механическая обработка и обезжиривание), физико-химические (электрохимические и облучение) и химические (травление) [6].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Подготовка поверхности металлов

Изготовление и применение в изделиях авиационной техники клеевых конструкций из металлических материалов (алюминиевых и титановых сплавов, конструкционной и коррозионностойкой стали) потребовали разработки технологических процессов для их специальной подготовки под склеивание, в первую очередь с использованием высокопрочных пленочных клеев конструкционного назначения. Подготовка поверхности металлов позволяет достичь длительного ресурса и надежности клеевых конструкций в процессе эксплуатации. Такая задача решена в результате исследований, выполненных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [4, 5].

Одним из эффективных методов является анодное окисление алюминиевых сплавов, в результате которого образуется пористая оксидная пленка, увеличивающая площадь контакта с клеем и улучшающая адгезию. Анодирование в хромовой кислоте повышает прочность и устойчивость к коррозии, тогда как анодирование в серной кислоте используется для менее ответственных конструкций [6].

В авиационной промышленности наиболее эффективным способом подготовки алюминиевых сплавов под склеивание высокопрочными эпоксидными пленочными клеями (ВК-31, ВК-36 и ВК-51) является технология хромоокислительного анодного окисления, высокопрочными фенолкаучуковыми клеями с повышенной эластичностью (ВК-3, ВК-32-200, ВК-50) – получение сернокислотного анодно-оксидного покрытия. При этом на поверхности образуется анодная пленка толщиной 5–8 мкм с уменьшенной пористостью [7]. Следует отметить, что использование сернокислотного анодного окисления под склеивание высокопрочными эпоксидными пленочными клеями не допускается. В этом случае наблюдается отрыв высокопрочным клеем анодной пленки от поверхности алюминиевого сплава, что ведет к разрушению клеевого соединения.

Кроме того, в технологических процессах склеивания применяются адгезионные грунты. Разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ грунт ЭП-0234 используется под склеивание высокопрочными эпоксидными и фенолкаучуковыми

клеями, применяемыми в авиастроении. Грунт ЭП-0234 представляет собой раствор эпоксидного олигомера с ингибиторами коррозии, применяется после анодного окисления и обеспечивает возможность увеличения времени между анодированием и склеиванием до 30 сут, а также долговременную защиту от коррозии [7].

Высокая эффективность анодного окисления алюминиевых сплавов для подготовки поверхности под склеивание подтверждена многолетним положительным опытом эксплуатации клеевых соединений в конструкции клеевых изделий самолетной и вертолетной техники.

Химическое травление и обезжиривание являются основными методами подготовки металлических поверхностей для улучшения их адгезионных свойств. Травление в кислотных или щелочных растворах удаляет оксидные слои и загрязнения. Это особенно важно для алюминиевых сплавов, подвергающихся анодированию, таких как АВТ1. Травление создает условия для формирования анодного слоя. Обезжиривание с использованием щелочей или растворителей, таких как бензин БР-1, удаляет органические загрязнения и подготавливает поверхность к дальнейшей обработке [8].

Механическая обработка, например пескоструйная, создает шероховатость поверхности для улучшения адгезии. Однако для титановых сплавов, таких как ОТ4, предпочтительны химические методы подготовки вследствие негативного влияния механической обработки на эксплуатационные свойства материала. Плазменная обработка и физико-химические методы, такие как ультрафиолетовое излучение и коронный разряд, повышают уровень адгезии за счет увеличения химической активности поверхности [8]. Защитные покрытия, полученные в результате хромирования и фосфатирования, применяются для повышения долговечности клеевых соединений в агрессивных условиях [9, 10].

Подготовка поверхности полимерных композиционных материалов

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ одновременно с разработкой технологий подготовки поверхности металлических материалов под склеивание созданы технологии склеивания неметаллических материалов авиационного назначения, в том числе угле- и стеклопластиков, в основном с использованием механических способов обработки (зашкуривание или опескоструивание). До недавнего времени эти способы были эффективными, так как композиционные материалы формовали из препрегов на основе связующих растворного типа. Они легко поддавались механической обработке, что обеспечивало достаточный уровень адгезии клея к таким поверхностям.

В настоящее время среди полимерных композиционных материалов (ПКМ) значительный объем составляют материалы, которые изготавливают с использованием современных эпоксидных связующих расплавного типа (в том числе клеевых связующих) и высокопрочных армирующих угле- и стеклонаполнителей – жгутовых, тканых и ленточных. Такие материалы обладают высоким уровнем деформационных и теплопрочностных характеристик. В то же время установлено, что во многих случаях применение традиционных механических способов обработки поверхности ПКМ такого типа, особенно под склеивание высокопрочными клеями, неэффективно. Связано это с тем, что поверхность отформованных ПКМ характеризуется пониженной поверхностной энергией, следствием чего является пониженный (до 40 %) уровень прочности клеевых соединений.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ исследованы образцы углепластиков на основе эпоксидного связующего расплавного типа и углеродной ткани УТ-900И.

Изучено влияние способа подготовки углепластика и титанового сплава ВТ6 под склеивание на прочность при сдвиге клеевых соединений, выполненных с использованием экспериментального образца высокопрочного эпоксидного клея, при температурах испытания -60 , $+20$ и $+120$ °С.

Показано, что ионная обработка поверхности углепластика непрактична из-за трудоемкости и ограниченного времени между обработкой и склеиванием, несмотря на достигнутую высокую прочность соединения. Обработка зашкуриванием с использованием механических шлифовальных инструментов также исключена из-за частичного разрушения ПКМ в процессе испытаний. Наилучшим методом подготовки поверхности углепластика является обезжиривание с использованием технического моющего средства ТМС ЛИ, эффективно удаляющее загрязнения.

Для титанового сплава в составе клеевого соединения наибольшая стойкость к воздействию повышенной влажности достигнута при использовании для обработки поверхности химического фосфатирования, в то время как механический способ продемонстрировал наихудшие результаты.

Прочность клеевых соединений углепластика и титанового сплава с использованием выбранных методов подготовки поверхности под склеивание (обезжиривание и химическое фосфатирование) составила $\sim 32,8$ МПа при 20 °С, $21,6$ МПа – при 120 °С, что подтверждает эффективность выбранных способов и важность правильного выбора методов подготовки поверхностей склеиваемых материалов.

Несмотря на полученные результаты, задача по поиску новых методов или возможности усовершенствования известных способов подготовки поверхности ПКМ под склеивание продолжает быть актуальной. В данной статье представлены результаты отечественных и зарубежных исследований, направленных на разработку перспективных технологий подготовки поверхности ПКМ под склеивание.

Согласно работе [11], в последнее время активно изучаются химические методы обработки поверхности ПКМ, например травление, которые обеспечивают химическую активацию поверхности и повышение адгезии клея к субстрату. Широко применяются физико-химические методы обработки поверхности ПКМ, такие как плазменная и ультрафиолетовое (УФ) излучение, которые повышают поверхностную энергию материала, что способствует лучшему смачиванию и сцеплению клея с субстратом. Актуальным направлением в данной области является обработка поверхности ПКМ лазером, которая позволяет изменять такие параметры, как шероховатость и поверхностная энергия. При этом исследователи изучают влияние этих параметров на механические характеристики клеевых соединений.

Наряду с перечисленными перспективными методами также применяются традиционные методы обработки ПКМ, например механическая обработка или сочетание механической обработки и химических методов.

Механические способы

Зашкуривание и пескоструйная обработка являются основными методами подготовки поверхности ПКМ для улучшения адгезии клеевых соединений. Зашкуривание с использованием абразивов зернистостью 220 мкм увеличивает прочность соединений на $17,6$ % по сравнению с абразивами зернистостью 60 мкм, при этом хаотичная шлифовка обеспечивает равномерную шероховатость и минимизирует дефекты [12, 13]. Пескоструйная обработка угле- и стеклопластиков с применением оксида алюминия увеличивает площадь контакта и улучшает сцепление клея [14].

Использование жертвенного слоя и пескоструйной обработки поверхности ПКМ позволяет увеличить прочность соединений до 60 % [13]. Обработка корундом зернистостью 75–90 мкм создает глубокие впадины, что увеличивает площадь контакта с клеем. Оптимальная продолжительность пескоструйной обработки составляет 20 с, что повышает шероховатость без повреждения волокон [15]. Увеличение продолжительности до 40 с ухудшает адгезию из-за повреждения поверхности.

Шлифовка и пескоструйная обработка с медными или алюминиевыми частицами существенно повышают механическое сцепление [16].

Химические методы

В работе [17] изложен всесторонний анализ влияния различных методов подготовки поверхности углепластика на прочность клеевых соединений. Рассмотрены такие методы подготовки поверхности, как механическая обработка (шлифование), химическое травление (кислотное и щелочное) и обеспечение шероховатости поверхности ПКМ за счет удаления жертвенного слоя.

Химическое травление приводит к изменению химического состава поверхности, что влияет на ее активацию и смачивание клеем. Кислотное травление с использованием 1,5 М раствора азотной кислоты обеспечивает наибольшее увеличение прочности клеевого соединения, в то время как щелочное травление часто вызывает появление неоднородности поверхности и, как следствие, снижение прочности клеевого соединения [18].

Исследована корреляционная зависимость между продолжительностью травления серной кислотой и адгезией плит из полиэтилена высокой плотности к плитам из ПКМ на основе армирующего стекловолокна и эпоксидной матрицы [19]. Экспериментальные результаты показали, что увеличение продолжительности травления 98%-ной серной кислотой до 120 мин приводит к значительному повышению прочности клеевого соединения, что подтверждается уменьшением угла смачивания.

В работе [20] рассматриваются методы химической функционализации поверхности углепластиков для улучшения адгезионного взаимодействия с клеем. Основное внимание уделяется двухэтапному процессу подготовки поверхности, включающему обработку коронным разрядом и последующее нанесение функциональных триалкоксисиланов и тиолов (метантиола, этантиола) на поверхность углепластика. Обработку поверхности углепластика коронным разрядом проводили при атмосферном давлении, что привело к увеличению содержания кислорода на поверхности углепластика с образованием полярных групп. Затем обработанные коронным разрядом образцы погружали в растворы GPTMS ((3-глицидоксипропил)-триметоксисилан) и TetraThiol (пентаэритритол-тетра(3-меркаптопропионат)) на 12 ч при комнатной температуре, после чего промывали тетрагидрофураном и сушили. Этот процесс обеспечил активацию функциональных групп на поверхности углепластика, что значительно повысило адгезию клея к обработанной поверхности. Прочность клеевого соединения образцов, модифицированных GPTMS, увеличилась на 80 %, модифицированных TetraThiol – до 85 % по сравнению с необработанными образцами.

Использование жертвенных слоев

Одним из основных этапов при склеивании деталей из ПКМ, в том числе применяемых в авиационной промышленности, является использование жертвенного слоя в процессе формования. Наиболее распространены жертвенные слои, изготовленные из полиамида, полиэстера или стекловолокна. В работе [21] приведены результаты

испытаний прочности клеевых соединений при сдвиге, демонстрирующие увеличение механических характеристик при использовании жертвенных слоев на основе различных наполнителей. Кроме того, исследовано наличие дефектов поверхности после обработки. Применение различных материалов в качестве жертвенного слоя позволяет варьировать состояние поверхности ПКМ и достичь оптимальных адгезионных характеристик клеевых соединений для конкретных условий эксплуатации клееной конструкции.

Исследование, результаты которого представлены в работе [22], показало, что применение жертвенных слоев из полиэстера способствует лучшей адгезии клея к поверхности ПКМ по сравнению с жертвенными слоями из нейлона. Это объясняется более чистой поверхностью с меньшим количеством волокон, которые остаются на поверхности ПКМ после удаления жертвенного слоя из полиэстера. Кроме того, показано, что применение полиэстера в качестве жертвенных слоев значительно повышает устойчивость клеевых соединений ПКМ к воздействию повышенных значений влажности и температуры по сравнению с клеевыми соединениями ПКМ, которые формовали с применением жертвенных слоев из полиамидной ткани.

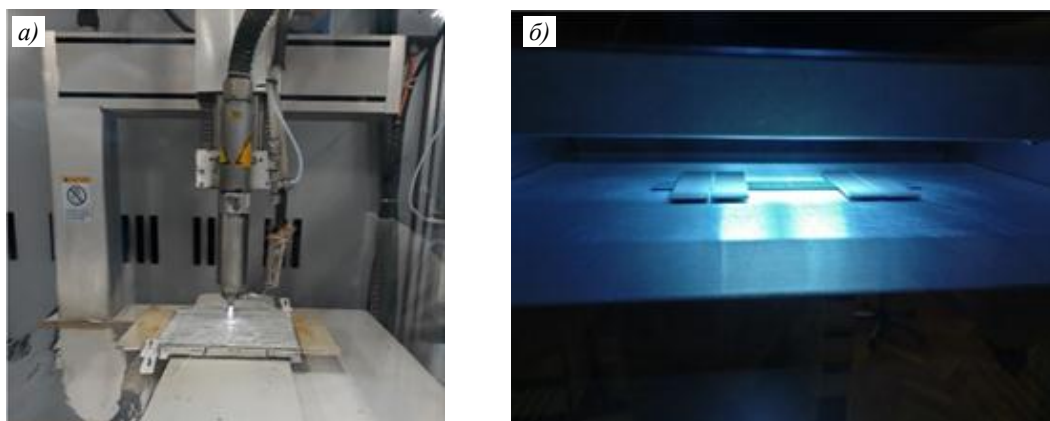
Обработка плазмой и ультрафиолетовым излучением

В работе [23] исследованы три типа композиционных материалов, армированных углеродным волокном: на основе полифениленсульфида (PPS), полиэфиримида (PEI) и полиэфирэфиркетона (PEEK). Для активации поверхности углепластика применяли три различных метода: обработка атмосферной плазмой, обработка УФ-излучением и очистка изопропанолом (в качестве контрольного способа). Обработка атмосферной плазмой значительно улучшает адгезионные свойства поверхности ПКМ на основе PPS и PEEK, увеличивая их поверхностную энергию и снижая углы смачивания. Обработка УФ-излучением также повышает прочность клеевых соединений. Однако в этом случае эффект менее выражен по сравнению с плазменной обработкой, после которой уровень данного показателя для PEEK увеличился на 110 %, для PPS – на 14 % в сравнении с контрольным способом. Отмечены увеличение содержания кислорода и образование карбонильных групп на поверхности углепластика после обработки УФ-излучением, что также способствовало улучшению адгезионных свойств исследованных материалов.

На рисунке представлено оборудование, использованное для обработки поверхностей композитов: установка атмосферной плазмы и система ультрафиолетовой обработки. Установку атмосферной плазмы (Университетский колледж Дублина, UCD) применяли для обработки поверхности углепластика на основе термопластичных матриц, таких как PEEK и PPS. Обработку проводили при оптимальных параметрах: напряжение 309 В, ток 14 А, расстояние между соплом и материалом 12,5 мм. Каждую область поверхности углепластика подвергали обработке в течение 10 с, что позволило достичь значительного увеличения адгезионных свойств. Система УФ-обработки в лаборатории Henkel Ireland представляет собой лампу с УФ-излучением (длина волны от 250 до 445 нм), что обеспечивает многослойную обработку поверхности материала. Экспозиция составила 10 с, что позволило улучшить адгезионные свойства обработанных поверхностей.

Обработка указанными методами не оказала значительного влияния на адгезионные свойства PEI, так как материал изначально обладал высокой прочностью клеевых соединений без дополнительной обработки благодаря химической совместимости с эпоксидными адгезивами [23]. Обработка атмосферной плазмой обеспечила более

выраженный эффект, но необходимо учитывать ограниченный срок его действия, так как активированные поверхности могут быстро деградировать. В результате УФ-обработки происходят более стабильные изменения молекулярной структуры, что делает этот метод перспективным для промышленного применения. Наибольшее влияние на адгезионные свойства поверхности углепластика оказывает коротковолновое излучение УФ-С, которое способствует образованию полярных функциональных групп, таких как карбонильные и гидроксильные, что улучшает смачивание поверхности адгезивами. Кроме того, УФ-облучение способствовало снижению угла смачивания и увеличению прочности клеевых соединений углепластика на основе РЕЕК и PPS при склеивании с алюминиевым сплавом [24]. Плазменная обработка с использованием аргона, азота или воздуха показала, что воздушная плазма обеспечивает наибольшее увеличение прочности при сдвиге клеевых соединений благодаря образованию amino- и гидроксильных групп на поверхности ПКМ [25].



Обработка поверхности углепластика с использованием установки атмосферной плазмы (а) и системы ультрафиолетовой обработки (б)

При выборе между обработкой поверхности углепластика коронным разрядом и плазменной обработкой нужно учитывать, что последний способ позволяет достичь более глубоких и контролируемых изменений в химическом составе поверхности ПКМ. Плазменная обработка может проводиться как при атмосферном, так и низком давлении, что улучшает гидрофильность и смачиваемость поверхности. Для плазменной обработки использовали установку, работающую при атмосферном давлении и высоком напряжении, что приводило к увеличению содержания кислорода и улучшению полярности обрабатываемой поверхности. Краевые углы смачивания уменьшились с 91 ± 2 до 36 ± 2 градусов, а прочность клеевого соединения достигала 29 ± 4 МПа. Эти результаты подтверждают, что плазменная обработка поверхности ПКМ обеспечивает более стабильные и эффективные результаты по сравнению с обработкой коронным разрядом [25].

Исследования показывают, что оба метода – плазменная и УФ-обработка – могут эффективно улучшить адгезионные свойства композитов при склеивании. Однако для достижения максимальных результатов необходимо учитывать состав материала и параметры обработки [23–26].

Метод коронного разряда

Метод коронного разряда заключается в воздействии на поверхность ПКМ ионизированного газа, создаваемого между электродами. Обычно для этого используются

такие газы, как кислород, аргон или аммиак [27]. Для обработки поверхности ПКМ применяется электрическое поле, создаваемое между высоковольтным электродом и заземленным металлическим барабаном, через который проходит полимерная пленка или другой материал. Это позволяет проводить обработку при атмосферном давлении без использования вакуумной камеры [28]. Метод коронного разряда эффективно изменяет химический состав поверхности ПКМ, повышая ее адгезионные свойства при нанесении покрытий или адгезивов без значительного воздействия на механические характеристики адгезионных соединений [29].

Метод коронного разряда используется для обработки угле- и стеклопластиков, позволяет улучшить адгезию за счет удаления загрязнений, изменения морфологии и увеличения концентрации кислорода на поверхности [28, 29]. Это повышает полярность и смачиваемость поверхности, а также прочность клеевых соединений [30]. Исследования показали, что коронный разряд активизирует химическое взаимодействие между адгезивом и субстратом [29].

Однако важно контролировать параметры процесса, чтобы избежать окисления и образования нежелательных соединений, таких как фторуглероды и оксиды, требующих дополнительной очистки [30]. Метод также ограничен размерами оборудования и требует контроля окружающей среды [31]. Тем не менее он остается востребованным благодаря простоте и низкой стоимости.

Лазерная обработка

Метод лазерной обработки основан на воздействии лазерного луча, что приводит к локальному нагреву и изменению химического состава поверхности материала в рабочей области действия прибора [32]. Этот метод используется для удаления загрязнений, модификации морфологии поверхности, улучшения электрических и механических свойств композитов [33]. Лазерную обработку можно выполнять с использованием различных типов лазеров, таких как эксимерный, ультрафиолетовый, инфракрасный или волоконный [34, 35].

Данный способ можно использовать для обработки материалов, чувствительных к температуре, так как лазеры с короткими длинами волн оказывают на полимерные материалы минимальный фототермический эффект [36]. Лазерное воздействие позволяет избирательно обрабатывать поверхности, регулируя их шероховатость и улучшая адгезионные свойства. Важными параметрами процесса являются мощность, частота, количество импульсов, расстояние до объекта и скорость, которые определяют качество воздействия лазера на обрабатываемую поверхность [34]. За счет высокой скорости процесса обеспечивается обработка лазером больших площадей поверхности ПКМ за короткое время.

Краевой угол смачивания и поверхностная энергия позволяют оценить адгезионные свойства обработанной поверхности. Чем меньше угол смачивания, тем больше способность поверхности к смачиванию адгезивом и качественнее клеевое соединение. После обработки лазером или плазмой угол смачивания значительно уменьшается, что свидетельствует об улучшении адгезии. С помощью таких методов исследований, как сессионный капельный метод, можно определить степень гидрофильности или гидрофобности, а также количественно оценить изменение поверхностной энергии обработанного композиционного материала.

Обработка пламенем

Метод обработки ПКМ пламенем заключается в использовании горелок, которые создают пламя за счет горения смеси воздуха и газа. При этом обрабатываемая

поверхность нагревается до температуры 900–1000 °С. Этот метод позволяет эффективно удалить загрязнения, изменить морфологию поверхности полимерного материала и увеличить ее смачиваемость адгезивом, улучшить адгезионные свойства клеевых соединений [37].

Эффективность метода зависит от ряда параметров: тип газа, количество проходов горелки, скорость обработки, соотношение газа и воздуха, расстояние между горелкой и поверхностью обрабатываемого образца. Например, применение пропана способствует образованию тонкого окисленного слоя на поверхности полиэтилена, в то время как газы, содержащие силан, формируют слой оксида кремния на поверхности углеродных композитов. Увеличение продолжительности воздействия пламени улучшает химическую активность поверхности материала за счет повышения концентрации карбоксильных групп [38]. Оптимизация параметров, таких как скорость обработки и количество проходов, критически важна для достижения нужного результата. Например, более медленная обработка может вызвать сильное окисление поверхности, что не всегда желательно [37].

Влияние обработки поверхности на механизмы адгезии

При выборе методов обработки поверхности ПКМ следует учитывать их влияние на механизмы, лежащие в основе процесса склеивания: механическое сцепление, адсорбция и химическое взаимодействие, диффузия и электростатическая адгезия. Эти механизмы зависят от свойств поверхности и могут быть улучшены с помощью различных методов подготовки [39, 40].

Механическое сцепление обеспечивается за счет проникновения адгезива в микротрещины и поры на поверхности ПКМ, что достигается методами зашкуривания, травления и пескоструйной обработки, которые увеличивают шероховатость. Адсорбция и химическое взаимодействие возникают за счет межмолекулярных связей – Ван-дер-Ваальса, водородных и ковалентных. Эти механизмы усиливаются методами функционализации поверхности, такими как плазменная и химическая обработка, которые способствуют образованию полярных функциональных групп на обработанной поверхности ПКМ [39, 41]. Диффузионные процессы наблюдаются, когда молекулы двух материалов проникают друг в друга, создавая слой с новыми свойствами на границе раздела. Этот процесс требует совместимости и частичной растворимости материалов и может быть активирован химической или термической обработкой. Электростатическая адгезия обусловлена передачей электронов между поверхностями и формированием двойного электрического слоя, что способствует адгезии в проводящих материалах. Однако этот механизм редко наблюдается в композитах.

Плазменная обработка, химическая функционализация и коронный разряд способствуют химическому связыванию за счет образования полярных групп, тогда как лазерная обработка и обработка пламенем улучшают как механическое сцепление, так и химическое связывание на границе «адгезив–субстрат» [42]. Эти способы в целом способствуют увеличению площади контакта адгезива с поверхностью субстрата и созданию более активных участков поверхности обработанного материала при взаимодействии с клеем [43]. В процессе химической обработки образование функциональных групп, таких как гидроксильные, карбонильные и эпоксидные, существенно повышает качество адгезии. Однако некоторые методы, такие как обработка щелочными и кислотными растворами, могут привести к образованию на поверхности ПКМ нежелательных химических продуктов, таких как кремний, фтор и сернистые соединения, которые ухудшают адгезионные свойства и требуют дополнительной обработки для их удаления [44]. В этом контексте плазменная обработка и химическая

функционализация являются предпочтительными методами, поскольку способствуют улучшению химического состава поверхности, не вызывая образования нежелательных продуктов [45].

Заключения

Из приведенных источников информации следует, что выбор методов подготовки поверхности ПКМ является критическим фактором, который напрямую влияет на механические и адгезионные свойства соединений. Изменения состояния поверхности ПКМ в ходе обработки могут касаться как топологии и текстуры, так и химического состава, что в свою очередь влияет на смачиваемость, шероховатость и поверхностную энергию материалов. Эти параметры определяют уровень прочностных характеристик адгезионных соединений. Важно правильно выбирать метод обработки поверхности для каждого типа материалов, чтобы достичь оптимального взаимодействия адгезива и субстрата при формировании клеевого соединения.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоматического формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
4. Исаев А.Ю., Рубцова Е.В., Котова Е.В., Сутягин М.Н. Исследование свойств клеев и клеевых связующих, изготовленных с использованием современной отечественной компонентной базы // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
5. 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://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-27-34.
6. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
7. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Исаев А.Ю., Смирнов О.И. Влияние адгезионного грунта ЭП-0234 на свойства клеевых соединений, полученных с применением клея ВК-36 // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-39-48.
8. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Шокин Г.И., Куцевич К.Е., Попкова Е.А. Метод оценки и факторы, влияющие на качество склеивания обшивки с сотовым наполнителем в конструкции пола и интерьера воздушных судов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
9. Лобанов М.Л., Кардолина Н.И., Россина Н.Г., Юровских А.С. Защитные покрытия. Екатеринбург: Изд-во Уральск. ун-та, 2014. 200 с.
10. Анодирование изделий из сплава Д16т // ООО «ПО «АЛЬФА-МЕТАЛЛ»: офиц. сайт. URL: <https://shop.alfametal.ru/about/articles/anodirovanie-izdeliy-iz-splava-d16t/> (дата обращения: 06.07.2024).
11. Как правильно подготовить поверхность // АО «Коалиция»: офиц. сайт. URL: <https://cltn.ru/tpost/mjcuarbfl1-kak-pravilno-podgotovit-poverhnost> (дата обращения: 08.07.2024).

12. Yang G., Yang T., Yuan W., Du Y. The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 160. P. 446–456.
13. Баранников А.А., Постнов В.И., Вешкин Е.А., Стрельников С.В., Сатдинов Р.А. Применение плазмы атмосферного давления как способ подготовки поверхности полимерных композиционных материалов под склеивание // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2021. № 5. С. 177–196.
14. Buchmann C., Langer S., Filsinger J., Drechsler K. Analysis of the removal of peel ply from CFRP surfaces // *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 89. P. 352–361.
15. Ramaswamy K., O'Higgins R.M., Kadiyala A.K. et al. Evaluation of grit-blasting as a pre-treatment for carbon-fibre thermoplastic composite to aluminium bonded joints tested at static and dynamic loading rates // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 185. P. 107765.
16. Gude M.R., Prolongo S.G., Ureña A. Adhesive bonding of carbon fibre/epoxy laminates: Correlation between surface and mechanical properties // *Surface and Coatings Technology*. 2012. Vol. 207. P. 602–607.
17. Martínez-Landeros V.H., Vargas-Islas S.Y., Cruz-González C.E. et al. Studies on the influence of surface treatment type, in the effectiveness of structural adhesive bonding for carbon fiber reinforced composites // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 39. P. 160–166.
18. Chen C., Zhang W., Li Y. et al. The Influence of Moisture Absorption Drying of Composite Materials on the Bonding Performance of the Joints // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2023. Vol. 308. P. 2200463.
19. Chitsaz D.R., Shokrieh M.M., Taheri-Behrooz F. An investigation on effects of acid etching duration on adhesive bonding of polyethylene to E-glass/epoxy composites // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018. Vol. 85. P. 177–183.
20. Jölly I., Schlögl S., Wolfahrt M. et al. Chemical functionalization of composite surfaces for improved structural bonded repairs // *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 69. P. 296–303.
21. Алямовский А.И., Земцова Е.В., Копыл Н.И., Обьедков М.Л. Влияние различных способов подготовки поверхности углепластиков на прочностные характеристики клеевых соединений // *Космическая техника и технологии*. 2023. Т. 2. С. 54–64.
22. Tracy J., Yin Y., Yang J. et al. Environmentally assisted crack growth in adhesively bonded composite joints // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 102. P. 368–377.
23. Scarselli G., Quan D., Murphy N. et al. Adhesion Improvement of Thermoplastics-Based Composites by Atmospheric Plasma and UV Treatments // *Applied Composite Materials*. 2021. Vol. 28. P. 71–89.
24. Quan D., Deegan B., Byrne L. et al. Rapid surface activation of carbon fibre reinforced PEEK and PPS composites by high-power UV-irradiation for the adhesive joining of dissimilar materials // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020. Vol. 137. P. 105976.
25. Lin J., Song C., Min J. et al. Influence of atmospheric pressure plasma treatment on the physico-chemical properties of carbon fiber composite surface and its interfacial adhesion with adhesive // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 194. Art. 108237.
26. 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: 15.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-26-40.
27. Comyn J., Mascia L., Xiao G., Parker B.M. Corona-discharge treatment of polyetheretherketone (PEEK) for adhesive bonding // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1996. Vol. 16 (4). P. 301–304.
28. Подготовка поверхности пластмасс перед склеиванием // ООО «Пластинфо.ру»: офиц. сайт.. URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/88/> (дата обращения: 11.07.2024).
29. Blackman B.R.K., Kinloch A.J., Watts J.F. The plasma treatment of thermoplastic fibre composites for adhesive bonding // *Composites*. 1994. Vol. 25 (5). P. 332–341.

30. Wingfield J.R.J. Treatment of composite surfaces for adhesive bonding // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1993. Vol. 13 (3). P. 151–156.
31. Goddard J.M., Hotchkiss J.H. Polymer surface modification for the attachment of bioactive compounds // *Progress in Polymer Science*. 2007. Vol. 32 (7). P. 698–725.
32. Fischer F., Kreling S., Dilger K. Surface structuring of CFRP by using modern excimer laser sources // *Physics Procedia*. 2012. Vol. 39. P. 154–160.
33. Almuhammadi K., Yudhanto A., Lubineau G. On the anisotropic behavior of electrodes for electrical-based monitoring of CFRP laminated composites // *Polymer Composites*. 2019. Vol. 40 (5). P. 2061–2066.
34. Palmieri F.L., Belcher M.A., Wohl C.J. et al. Laser ablation surface preparation for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy composites // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016. Vol. 68. P. 95–101.
35. Zhan X., Chen S., Li Y. et al. Effect of surface cold ablation on shear strength of CFRP adhesively bonded joint after UV laser treatment // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2019. Vol. 94. P. 13–23.
36. Min J., Wan H., Carlson B.E. et al. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review // *Optics and Laser Technology*. 2020. Vol. 128. Art. 106188.
37. Adhesive bonding – Science, technology and applications / ed. R.D. Adams. Woodhead Publishing Limited, 2005. 538 p.
38. 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.
39. Kinloch A.J. Adhesion and adhesives: Science and technology. Springer-Sci+Business Media, B.V., 1987. 441 p.
40. Jialanella G.L. Advances in bonding plastics // *Advances in structural adhesive bonding*. Woodhead Publishing Limited, 2010. P. 237–264.
41. Baldan A. Adhesion phenomena in bonded joints // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2012. Vol. 38. P. 95–116.
42. Tao R., Alfano M., Lubineau G. Laser-based surface patterning of composite plates for improved secondary adhesive bonding // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 109. P. 84–94.
43. Prolongo S.G., Gude M.R., Del Rosario G., Ureña A. Surface pretreatments for composite joints: Study of surface profile by SEM image analysis // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2010. Vol. 24 (11–12). P. 1855–1867.
44. Kanerva M., Saarela O. The peel ply surface treatment for adhesive bonding of composites: A review // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2013. Vol. 43. P. 60–69.
45. Lee C.Y., Bae J.H., Kim T.Y. et al. Using silane-functionalized graphene oxides for enhancing the interfacial bonding strength of carbon/epoxy composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015. Vol. 75. P. 11–17.

References

1. 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.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: September 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.

4. Isaev A.Yu., Rubtsova E.V., Kotova E.V., Sutyagin M.N. Research of properties of glues and glue binding, made with use of modern domestic component base. *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 22, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
5. 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: September 21, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-27-34.
6. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
7. Petrova A.P., Lukina N.F., Isaev A.Yu., Smirnov O.I. The effect of the adhesive primer EP-0234 on the properties of adhesive compounds obtained using adhesive VK-36. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-39-48.
8. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Shokin G.I., Kutsevich K.E., Popkova E.A. Evaluation method and factors influencing the bonding quality between face and honey-comb cores in floor and interior aircraft panels. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
9. Lobanov M.L., Kardonina N.I., Rossina N.G., Yurovskikh A.S. *Protective coatings*. Ekaterinburg: Ural Univ. Publ. House, 2014. 200 p.
10. *Anodizing of products from alloy D16t*. Available at: <https://shop.alfametal.ru/about/articles/anodirovanie-izdeliy-iz-splava-d16t/> (accessed: July 06, 2024).
11. *How to properly prepare the surface*. Available at: <https://cltn.ru/tpost/mjcuarbf11-kak-pravilno-podgotovit-poverhnost> (accessed: July 08, 2024).
12. Yang G., Yang T., Yuan W., Du Y. The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 160, pp. 446–456.
13. Barannikov A.A., Postnov V.I., Veshkin E.A., Strelnikov S.V., Satdinov R.A. Use of atmospheric pressure plasma as a method for preparing the surface of polymer composite materials for bonding. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2021, no. 5, pp. 177–196.
14. Buchmann C., Langer S., Filsinger J., Drechsler K. Analysis of the removal of peel ply from CFRP surfaces. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 89, pp. 352–361.
15. Ramaswamy K., O'Higgins R.M., Kadiyala A.K. et al. Evaluation of grit-blasting as a pre-treatment for carbon-fibre thermoplastic composite to aluminium bonded joints tested at static and dynamic loading rates. *Composites Part B: Engineering*, 2020, vol. 185, p. 107765.
16. Gude M.R., Prolongo S.G., Ureña A. Adhesive bonding of carbon fibre/epoxy laminates: Correlation between surface and mechanical properties. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 602–607.
17. Martínez-Landeros V.H., Vargas-Islas S.Y., Cruz-González C.E. et al. Studies on the influence of surface treatment type, in the effectiveness of structural adhesive bonding for carbon fiber reinforced composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 39, pp. 160–166.
18. Chen C., Zhang W., Li Y. et al. The Influence of Moisture Absorption Drying of Composite Materials on the Bonding Performance of the Joints. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2023, vol. 308, p. 2200463.
19. Chitsaz D.R., Shokrieh M.M., Taheri-Behrooz F. An investigation on effects of acid etching duration on adhesive bonding of polyethylene to E-glass/epoxy composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, vol. 85, pp. 177–183.
20. Jölly I., Schlögl S., Wolfahrt M. et al. Chemical functionalization of composite surfaces for improved structural bonded repairs. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 69, pp. 296–303.
21. Alyamovsky A.I., Zemtsova E.V., Kopyl N.I., Obyedkov M.L. Influence of various methods of surface preparation of carbon fiber reinforced plastics on the strength characteristics of adhesive joints. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2023, vol. 2, pp. 54–64.

22. Tracy J., Yin Y., Yang J. et al. Environmentally assisted crack growth in adhesively bonded composite joints. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, vol. 102, pp. 368–377.
23. Scarselli G., Quan D., Murphy N. et al. Adhesion Improvement of Thermoplastics-Based Composites by Atmospheric Plasma and UV Treatments. *Applied Composite Materials*, 2021, vol. 28, pp. 71–89.
24. Quan D., Deegan B., Byrne L. et al. Rapid surface activation of carbon fibre reinforced PEEK and PPS composites by high-power UV-irradiation for the adhesive joining of dissimilar materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, vol. 137, p. 105976.
25. Lin J., Song C., Min J. et al. Influence of atmospheric pressure plasma treatment on the physicochemical properties of carbon fiber composite surface and its interfacial adhesion with adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 2020, vol. 194, art. 108237.
26. 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. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 15, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-26-40.
27. Comyn J., Mascia L., Xiao G., Parker B.M. Corona-discharge treatment of polyetheretherketone (PEEK) for adhesive bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1996, vol. 16 (4), pp. 301–304.
28. *Preparation of plastic surfaces before gluing*. Available at: <https://plastinfo.ru/information/articles/88/> (accessed: July 11, 2024).
29. Blackman B.R.K., Kinloch A.J., Watts J.F. The plasma treatment of thermoplastic fibre composites for adhesive bonding. *Composites*, 1994, vol. 25 (5), pp. 332–341.
30. Wingfield J.R.J. Treatment of composite surfaces for adhesive bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1993, vol. 13 (3), pp. 151–156.
31. Goddard J.M., Hotchkiss J.H. Polymer surface modification for the attachment of bioactive compounds. *Progress in Polymer Science*, 2007, vol. 32 (7), pp. 698–725.
32. Fischer F., Kreling S., Dilger K. Surface structuring of CFRP by using modern excimer laser sources. *Physics Procedia*, 2012, vol. 39, pp. 154–160.
33. Almuhammadi K., Yudhanto A., Lubineau G. On the anisotropic behavior of electrodes for electrical-based monitoring of CFRP laminated composites. *Polymer Composites*, 2019, vol. 40 (5), pp. 2061–2066.
34. Palmieri F.L., Belcher M.A., Wohl C.J. et al. Laser ablation surface preparation for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016, vol. 68, pp. 95–101.
35. Zhan X., Chen S., Li Y. et al. Effect of surface cold ablation on shear strength of CFRP adhesively bonded joint after UV laser treatment. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019, vol. 94, pp. 13–23.
36. Min J., Wan H., Carlson B.E. et al. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. *Optics and Laser Technology*, 2020, vol. 128, art. 106188.
37. *Adhesive bonding – Science, technology and applications*. Ed. R.D. Adams. Woodhead Publishing Limited, 2005, 538 p.
38. 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.
39. Kinloch A.J. *Adhesion and adhesives: Science and technology*. Springer-Sci+Business Media, B.V., 1987, 441 p.
40. Jialanella G.L. Advances in bonding plastics. *Advances in structural adhesive bonding*. Woodhead Publishing Limited, 2010, pp. 237–264.
41. Baldan A. Adhesion phenomena in bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012, vol. 38, pp. 95–116.

42. Tao R., Alfano M., Lubineau G. Laser-based surface patterning of composite plates for improved secondary adhesive bonding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, vol. 109, pp. 84–94.
43. Prolongo S.G., Gude M.R., Del Rosario G., Ureña A. Surface pretreatments for composite joints: Study of surface profile by SEM image analysis. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2010, vol. 24 (11–12), pp. 1855–1867.
44. Kanerva M., Saarela O. The peel ply surface treatment for adhesive bonding of composites: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013, vol. 43, pp. 60–69.
45. Lee C.Y., Bae J.H., Kim T.Y. et al. Using silane-functionalized graphene oxides for enhancing the interfacial bonding strength of carbon/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, vol. 75, pp. 11–17.

Информация об авторах

Дубровин Илья Михайлович, техник 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лопатина Марина Федоровна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Исаев Алексей Юрьевич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Старков Алексей Игоревич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ilya M. Dubrovin, Second Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Marina F. Lopatina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey Yu. Isaev, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey I. Starkov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.01.2025.
The article was submitted 09.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 14.01.2025.