

Научная статья

УДК 621.79

DOI: 10.180577/2307-6046-2026-0-9-59-70

ТЕХНОЛОГИИ СКЛЕИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ

Е.В. Рубцова¹, О.С. Балабанова¹, А.Ю. Исаев¹, О.И. Смирнов¹, Н.Ф. Лукина¹

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

Аннотация. Представлены результаты исследований, направленных на разработку технологического процесса склеивания полимерных композиционных материалов с пониженной поверхностной энергией с использованием современных способов подготовки поверхностей. Показано, что с применением оптимального способа обработки поверхности материала перед склеиванием (химическим составом или плазмой атмосферного давления) достигается существенное повышение прочности клеевых соединений при температурах до 150 °С по сравнению с необработанной и обработанной механическими способами поверхностями.

Ключевые слова: технология склеивания, пленочный клей конструкционного назначения, подготовка поверхности под склеивание, прочность клеевого соединения, химический способ, плазма атмосферного давления, режимы обработки

Для цитирования: Рубцова Е.В., Балабанова О.С., Исаев А.Ю., Смирнов О.И., Лукина Н.Ф. Технологии склеивания элементов конструкций из ПКМ с применением перспективных способов подготовки поверхности // Труды ВИАМ. 2026. № 9 (163). С. 59–70. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.180577/2307-6046-2026-0-9-59-70.

Scientific article

TECHNOLOGIES FOR BONDING PCM STRUCTURAL ELEMENTS USING ADVANCED SURFACE PREPARATION METHODS

E.V. Rubtsova¹, O.S. Balabanova¹, A.Yu. Isayev¹, O.I. Smirnov¹, N.F. Lukina¹

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

Abstract. This article presents the results of a research aimed at developing a technological process for bonding polymeric composite materials with low surface energy using modern surface preparation methods. It is shown that using an optimal surface treatment method for PKM before bonding (chemical treatment or atmospheric pressure plasma), results in a significant increase in strength of adhesive joints at temperatures up to 150 °C compared to the untreated surface and to the mechanically processed surface.

Keywords: bonding technology, structural film adhesive, surface treatment for bonding, strength of adhesive joint, chemical treatment method, atmospheric pressure plasma, surface treatment modes

For citation: Rubtsova E.V., Balabanova O.S., Isayev A.Yu., Smirnov O.I., Lukina N.F. Technologies for bonding PCM structural elements using advanced surface preparation methods. *Trudy VIAM*, 2026, no. 9 (163), pp. 59–70. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.180577/2307-6046-2026-0-9-59-70.

Введение

При изготовлении элементов конструкций изделий авиационной техники с различным типом деталей и агрегатов широко используются высокопрочные клеи конструкционного назначения, в том числе эпоксидные пленочные клеи марок ВК-51, ВК-36 и их модификации. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны технологические процессы склеивания, включающие эффективные способы подготовки поверхностей металлических материалов (алюминиевых сплавов, углеродистых, титановых и нержавеющей сталей) под склеивание с использованием конструкционных пленочных клеев. Такие клеи применяются в процессе сборки высокоресурсных клееных конструкций из металлических материалов, в том числе трехслойных сотовых, которые широко внедрены на предприятиях авиационной промышленности и обеспечивают длительный ресурс и надежность в процессе эксплуатации авиационной техники.

В последнее время в авиационной промышленности все чаще применяют полимерные композиционные материалы (ПКМ), в частности принципиально новые – на основе клеевых стеклопрепегов марок КМКС, в составе которых в качестве полимерной матрицы используются эпоксидные клеевые связующие расплавного типа с различным уровнем теплопрочностных и деформационных характеристик.

Установлено, что поверхность отформованных стеклопластиков из клеевых препрегов КМКС характеризуется чрезвычайно плотной структурой с пониженной химической активностью. За счет этого в результате применения типовых технологий склеивания деталей и агрегатов из клеевых препрегов КМКС отмечается пониженный (до 30 %) уровень прочностных характеристик клеевых соединений из ПКМ.

За рубежом используются различные способы активации склеиваемых поверхностей ПКМ, в том числе обработка химическими составами и ионно-плазменная обработка с применением плазмы атмосферного давления (ПАД). Данные технологии также показали эффективность в процессе активации поверхности ПКМ под склеивание эпоксидными клеями холодного отверждения отечественного производства.

Цель работы – исследование и выбор оптимального способа подготовки поверхности ПКМ из клеевых препрегов КМКС под склеивание высокопрочным пленочным эпоксидным клеем марки ВК-36Р горячего отверждения.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись:

- конструкционный эпоксидный пленочный клей марки ВК-36Р горячего отверждения (ТУ 1-596-389-96);
- образцы из ПКМ, отформованных из клеевых стеклопрепеге марок КМКС-2м.120.Т10 и КМКС-4м.175.Т64.

Для оценки влияния способов подготовки поверхности ПКМ под склеивание на прочность клеевых соединений, выполненных клеем ВК-36Р, проводили испытания на сдвиг (ГОСТ 14759-69) и равномерный отрыв обшивки от сот (ОСТ 1 90069-72).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Анализ патентно-технических источников информации в исследуемой области показал следующее. Основной целью разработки новых технологий склеивания является поиск наиболее эффективного способа подготовки склеиваемых поверхностей, в том числе из ПКМ, с целью повышения адгезионной способности поверхности субстрата путем увеличения площади смачивания наносимым на нее адгезивом, удаления слабых

поверхностных слоев, создания необходимого микрорельефа. Специальная цель заключается в повышении свободной энергии поверхности субстрата. С эксплуатационной точки зрения основной целью подготовки поверхности ПКМ является обеспечение долговременной прочности и надежности клеевых соединений. Таким образом, достижение высоких значений адгезионной прочности клеевых соединений должно совмещаться с обеспечением их надежности в конструктивных элементах [1–3].

Для обработки поверхности под склеивание используются физические (механические, абразивные), химические, физико-химические и электрохимические способы [4, 5].

К физическим (механическим) способам обработки поверхности под склеивание относятся абразивная обработка струйными методами и зачистка поверхностей шлифовальной бумагой. Эти способы до настоящего времени широко применяют для подготовки поверхности металлов, некоторых ПКМ, керамики и резин. Однако исследователи отмечают, что механическая обработка поверхности ПКМ перед склеиванием имеет существенные недостатки, в том числе может нарушиться целостность верхних слоев наполнителя, что может привести к снижению механических характеристик склеиваемых деталей. После пескоструйной обработки склеиваемых поверхностей клеевые соединения имеют низкую стойкость к комбинированному действию повышенных температур и влажности [6].

Более эффективными являются химические способы подготовки поверхности под склеивание. Например, химические (электрохимические) способы травления и анодного оксидирования широко применяют для обработки поверхности металлических материалов. При химических способах подготовки изменяются химические и физические свойства поверхности, повышается адгезионная способность. Травление применяют также для подготовки поверхностей ряда неметаллических материалов – резин, трудносклеиваемых материалов (фторопласта, пластмасс, полиэтилентерефталата и др.), а также некоторых типов ПКМ. Однако установлено, что после травления поверхности детали можно хранить ≤ 14 сут до начала процесса склеивания. При более длительном хранении прочность клеевых соединений снижается. В наибольшей степени (до 80 %) прочность клеевых соединений уменьшается после хранения подготовленной поверхности в течение 30 сут.

Повышению активности склеиваемой поверхности способствует применение адгезионных грунтов, которые предварительно наносят на материал. В клеевом соединении они выполняют следующие функции:

- защита подготовленных под склеивание поверхностей при промежуточной обработке, транспортировке и хранении деталей;
- увеличение промежутка времени между операциями подготовки поверхности и склеивания;
- увеличение количества деталей, проходящих одновременную подготовку поверхности;
- предохранение подготовленной поверхности от загрязнения при проведении межоперационных мероприятий;
- улучшение смачивания клеем поверхности субстрата (за счет низкой вязкости грунта или путем введения в грунт специальных компонентов).

Некоторые исследователи предлагают сочетать различные способы обработки поверхности стеклопластика. Например, в статье [7] рассмотрено влияние подготовки поверхности на прочность соединения «акриловый клей–стеклопластик». Установлено, что пескоструйная обработка поверхности стеклопластика с последующей обработкой химическими соединениями (силанами) и с использованием ПАД значительно улучшает адгезионные свойства клеевого соединения по сравнению с пескоструйным способом.

Широкое распространение получили жертвенные ткани, которые используются в качестве расходного материала в процессе формования деталей из ПКМ, подлежащих дальнейшему склеиванию. Жертвенная ткань производится из полиэфира, нейлона, политетрафторэтилена, полиамида, отличается характерной текстурой и используется для создания текстурированной (шероховатой) поверхности отформованной детали перед склеиванием, что обеспечивает улучшенное смачивание клеем и, как следствие, повышение адгезии клея к склеиваемой поверхности. Запатентован способ склеивания неметаллических материалов с «жертвенным» слоем на поверхности, после удаления которого на поверхности субстрата остается полимерная пленка, выполняющая функцию адгезионного праймера (активатора адгезии) и повышающая адгезионные характеристики клея [8].

В настоящее время наиболее перспективны физико-химические методы подготовки поверхности ПКМ под склеивание, такие как обработка коронным разрядом, ультрафиолетовым излучением, пламенная.

Запатентованы способ и оборудование для ремонта композиционных материалов авиационной техники, заключающийся в предварительной подготовке поверхностей перед склеиванием. Данная подготовка проводится локально с применением ультразвуковых пьезоэлектрических нагревателей и позволяет придать необходимую форму поврежденному участку, обеспечить необходимые адгезионные свойства для дальнейшего склеивания [9].

В работе [10] представлены результаты исследований по влиянию обработки различных материалов (стекло- и углепластика, поликарбоната, силикона, алюминия и др.) эксимерным лазером на адгезию клеев к обработанной поверхности. Установлено, что, несмотря на необходимость тщательного подбора параметров лазерной обработки для каждого материала (интенсивность, длительность и частота импульсов), такой подход значительно увеличивает адгезию клея к подготовленной поверхности.

Разработан способ модифицирования поверхности различных материалов (комполитов, черных и цветных металлов и сплавов) методом лазерной абляции [11]. Данный процесс позволяет получить необходимое значение поверхностной энергии субстрата, что влияет на адгезионные свойства клея и прочность клеевых соединений.

В патенте [12] предложен способ подготовки поверхности ПКМ под склеивание методом лазерного модифицирования. Данный метод позволяет получить оптимальные адгезионные свойства, а также добиться требуемых геометрических показателей поверхности.

Обработка коронным разрядом (воздействие неустойчивой плазмы при атмосферном давлении) представляет собой один из наиболее популярных современных способов подготовки поверхности пластиков. Целью такой обработки обычно является получение поверхности, более восприимчивой к последующему нанесению полиграфической краски или функционального покрытия. Данный способ иногда используют для объемных пластиковых изделий.

Пламенная обработка является вторым по популярности (после коронного разряда) способом подготовки поверхности полимеров для повышения поверхностной энергии. Важным моментом в работе установки для пламенной обработки является соотношение между природным газом и воздухом в смеси. В зависимости от содержания газа в смеси характеристики пламени могут значительно различаться. Пламенную обработку можно выполнить вручную с использованием паяльной лампы, однако в этом случае труднее обеспечить равномерную подготовку поверхности.

Известна технология склеивания трудносклеиваемых полимеров, таких как полиолефины, фторопласты, эластомеры [13], включающая механическую обработку поверхности с дополнительной обработкой тлеющим разрядом.

Термическая обработка материала когерентными источниками света все чаще находит применение в технологии изготовления пластических масс. Однако в настоящее время для подготовки поверхности с целью улучшения адгезии при склеивании пластмасс лазеры используют редко. Это обусловлено высокой стоимостью лазерной обработки по сравнению с обработкой ПАД или коронным разрядом [14].

В патенте [15] предложен способ подготовки стекло- и углепластиков перед склеиванием с применением ПАД, улучшающий адгезионные свойства поверхности.

В работе [16] отмечено, что высоких значений прочности адгезионного соединения в рамках адсорбционной (молекулярной) теории адгезии можно достичь в тех случаях, когда адгезив и субстрат обладают полярными функциональными группами. Обработка и модифицирование (функционализация, активация) поверхности ПКМ с использованием ПАД позволяют повысить адгезию жидкого компонента адгезива к ПКМ благодаря увеличению свободной энергии поверхности. В статье приведены результаты собственных исследований способов подготовки поверхности стеклопластика марки ВПС-53К на основе клеевого препрега КМКС-2мР.120.РВМПН под склеивание эпоксидным клеем холодного отверждения марки ВК-27. Отмечено, что стеклопластик ВПС-53К, как и стеклопластики многих других марок, характеризуется низкой смачиваемостью (краевой угол смачивания (КУС) >90 градусов). Авторы работы исследовали состояние поверхности стеклопластика ВПС-53К до и после обработки ПАД и установили связь энергетических характеристик с прочностью клеевого соединения. Обработка с использованием ПАД повышает полярную составляющую свободной энергии поверхности материала, которая находится в прямой корреляции с адгезионной прочностью. В результате проведенных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ исследований разработана технология подготовки поверхности ПКМ под склеивание с использованием ПАД. Однако она применима только для склеивания стеклопластиков на основе клеевых препрегов марок КМКС с использованием клея ВК-27 и не распространяется на склеивание стеклопластиков высокопрочными пленочными клеями конструкционного назначения.

Таким образом, на основании анализа научно-технической и патентной информации выявлено, что применение современных методов активации поверхности полимерных материалов способствует решению многих технологических задач [17–21].

Применительно к технологиям склеивания полимерных материалов с пониженной поверхностной активностью максимальная прочность клеевых соединений достигается за счет обработки химическим составом или ПАД.

В рамках данной работы исследовано влияние рецептуры химических составов на эффективность обработки поверхности образцов ПКМ из клеевых препрегов марок КМКС-2м.120.Т10 и КМКС-4м.175.Т64. С этой целью выбраны различные экспериментальные химические составы, которые представляют собой растворы кислот, органических растворителей, поверхностно-активных веществ (ПАВ), пенетрантов и загустителей в различных концентрациях и сочетаниях. Основой химических составов являлась дистиллированная вода. Определяли работоспособность и степень влияния экспериментальных составов на шероховатость и КУС. Для этого химические составы наносили на поверхность образцов из ПКМ, выдерживали определенное время, смывали проточной водой и проводили измерения в пяти точках.

В результате испытаний установлено, что наиболее эффективными являются составы, включающие следующие химические вещества:

- состав 1 – фтороводород, метилхлорид, изопропиловый спирт, загуститель и ПАВ;
- состав 2 – фтороводород, загуститель, ПАВ и смачиватель.

Определены технологические параметры (температура и продолжительность) обработки, шероховатость и КУС поверхности ПКМ после обработки химическими

составами 1 и 2 в сравнении с механическими способами обработки (табл. 1). В данной статье во всех таблицах приведены средние значения показателей.

Установлено, что выбранные химические составы вызывают протравливание поверхности ПКМ, тем самым увеличивая шероховатость и снижая КУС.

Таблица 1

Влияние способов обработки на шероховатость и краевой угол смачивания поверхности образцов ПКМ на основе клеевых препрегов

Способ обработки	Шероховатость R_a , мкм, для образца на основе препрега		Краевой угол смачивания, градус, для образца на основе препрега	
	КМКС-2м.120.Т10	КМКС-4м.175.Т64	КМКС-2м.120.Т10	КМКС-4м.175.Т64
Без обработки	0,4630	0,5422	98,4	97,0
Пескоструйный	9,5079	6,5962	102,7	99,2
Зачистка шлифовальной бумагой	3,3561	2,4599	106,2	89,6
Химический с использованием состава:				
1	5,1313	4,5229	83,6	86,9
2	1,6312	1,6109	77,4	79,7

Исследовано влияние обработки химическими составами 1 и 2 поверхности ПКМ на основе клеевых препрегов КМКС-2м.120.Т10 и КМКС-4м.175.Т64 (в сравнении с механическими способами обработки и без обработки) на прочность при сдвиге клеевых соединений, выполненных с использованием пленочного клея ВК-36Р, при температурах от 20 до 150 °С. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние способа обработки поверхности ПКМ на основе клеевых препрегов химическими составами 1 и 2 на прочность при сдвиге клеевых соединений

Клеевой препрег	Способ обработки	Прочность при сдвиге, МПа, при температуре испытаний, °С		
		20	120	150
КМКС-2м.120.Т10	Без обработки	13,0	13,0	—
	Зачистка шлифовальной бумагой	18,7	17,6	
	Пескоструйный	19,5	19,0	
	Химический с использованием состава:			
	1	22,4	21,8	
КМКС-4м.175.Т64	2	18,9	17,7	—
	Без обработки	11,5		
	Зачистка шлифовальной бумагой	18,5		
	Пескоструйный	21,0		
	Химический с использованием состава:			
	1	23,0		22,0
	2	18,7		17,0

Более высокий уровень прочности клеевых соединений достигается в случае обработки поверхности ПКМ химическим составом 1. Представленные в табл. 2 значения прочности клеевых соединений получены с использованием оптимального температурно-временного режима обработки склеиваемых поверхностей образцов из ПКМ, который обеспечивает требуемую степень травления.

Исследована возможность подготовки поверхности ПКМ из клеевых препрегов КМКС-2м.120.Т10 и КМКС-4м.175.Т64 под склеивание клеем ВК-36Р за счет обработки ПАД – частично ионизированным газом, генерируемым при давлении, близком к давлению окружающей среды (~1 ат). При этом предпочтительной для активации и очистки поверхностей материалов являлась холодная плазма с температурой 30–40 °С.

С учетом опыта по использованию ПАД для обработки поверхности ПКМ под склеивание клеем холодного отверждения ВК-27 выбраны аналогичные режимы подготовки поверхности образцов под склеивание клеем горячего отверждения ВК-36, включающие оптимальные значения шага и скорости обработки, расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности, относительной мощности и расхода плазмообразующего газа.

Результаты испытаний по оценке влияния различных способов обработки поверхности ПКМ (механических и ПАД) на прочность клеевых соединений ПКМ + ПКМ и ПКМ + алюминиевый сплав Д16-АТ, выполненных клеем ВК-36, при температурах от 20 до 150 °С представлены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние способа обработки поверхности ПКМ на основе клеевых препрегов плазмой атмосферного давления (ПАД) по оптимальному режиму в сравнении с механическими способами на прочность при сдвиге клеевых соединений

Склеиваемые материалы	Способ подготовки	Прочность при сдвиге, МПа, при температуре испытаний, °С		
		20	120	150
ПКМ на основе препрега КМКС-2м.120.Т10	Без обработки	14,3	13,9	–
	Зачистка шлифовальной бумагой	19,2	18,0	
	Пескоструйный	20,1	19,4	
	ПАД	26,1	24,2	
ПКМ на основе препрега КМКС-4м.175.Т64	Без обработки	11,7	–	10,2
	Зачистка шлифовальной бумагой	19,7		18,2
	Пескоструйный	20,8		20,2
	ПАД	25,5		23,9
ПКМ на основе препрега КМКС-2м.120.Т10 + Д16-АТ	Без обработки	14,0	11,9	–
	Зачистка шлифовальной бумагой	20,8	18,0	
	Пескоструйный	22,1	20,8	
	ПАД	26,5	24,3	
ПКМ на основе препрега КМКС-4м.175.Т64 + Д16-АТ	Без обработки	13,7	–	10,3
	Зачистка шлифовальной бумагой	18,9		16,9
	Пескоструйный	21,4		20,2
	ПАД	26,2		24,9

Подготовка поверхностей с использованием ПАД по оптимальному режиму способствует существенному (в ~2 раза) повышению прочности клеевых соединений в сравнении с необработанной и обработанной механическими способами поверхностями. При этом следует отметить, что использование оптимальных технологических параметров процесса обработки поверхности ПКМ позволяет достичь преимущественно когезионного характера разрушения клеевых соединений, а применение режимов, отличающихся от оптимального, – адгезионного или смешанного (адгезионно-когезионного).

Результаты, представленные в табл. 1–3, получены на стандартных образцах, изготовленных в лабораторных условиях. Практический интерес представляет оценка эффективности выбранных способов подготовки поверхности ПКМ (химический

и с использованием ПАД) при переходе от лабораторного способа изготовления к опытному путем формования клеевых соединений при склеивании ПКМ между собой и с алюминиевым сплавом Д16-АТ методом автоклавного, вакуумного формования и прессовым методом. В табл. 4–6 представлены результаты испытаний клеевых соединений, изготовленных в опытном производстве.

Таблица 4

**Прочность при сдвиге клеевых соединений,
изготовленных методом автоклавного формования**

Склеиваемые материалы	Способ обработки	Прочность при сдвиге, МПа, при температуре испытаний, °С		
		20	120	150
ПКМ на основе препрега КМКС-2м.120.Т10	Без обработки	15,5	15,0	–
	Пескоструйный	21,0	20,3	
	ПАД	27,5	25,0	
	Химический	23,2	22,5	
ПКМ на основе препрега КМКС-4м.175.Т64	Без обработки	12,7	–	11,0
	Пескоструйный	21,2		20,6
	ПАД	26,7		25,1
	Химический	23,8		22,6
ПКМ на основе препрега КМКС-2м.120.Т10 + Д16-АТ	Без обработки	14,2	12,2	–
	Пескоструйный	22,8	21,7	
	ПАД	27,4	25,0	
	Химический	23,4	22,0	
ПКМ на основе препрега КМКС-4м.175.Т64 + Д16-АТ	Без обработки	13,8	–	10,9
	Пескоструйный	21,8		20,6
	ПАД	27,5		25,3
	Химический	24,2		23,0

Примечание. ПАД – плазма атмосферного давления.

Таблица 5

**Прочность при сдвиге клеевых соединений,
изготовленных методом вакуумного формования**

Склеиваемые материалы	Способ обработки	Прочность при сдвиге, МПа, при температуре испытаний, °С		
		20	120	150
ПКМ на основе препрега КМКС-2м.120.Т10	Без обработки	14,4	14,0	–
	Пескоструйный	20,2	19,4	
	ПАД	25,7	24,5	
	Химический	22,4	21,7	
ПКМ на основе препрега КМКС-4м.175.Т64	Без обработки	11,9	–	10,0
	Пескоструйный	20,3		19,5
	ПАД	26,1		24,5
	Химический	23,2		22,0
ПКМ на основе препрега КМКС-2м.120.Т10 + Д16-АТ	Без обработки	13,6	11,6	–
	Пескоструйный	20,0	18,9	
	ПАД	26,3	23,9	
	Химический	22,4	21,1	
ПКМ на основе препрега КМКС-4м.175.Т64 + Д16-АТ	Без обработки	13,1	–	9,8
	Пескоструйный	21,3		19,8
	ПАД	26,4		24,7
	Химический	23,5		22,8

Примечание. ПАД – плазма атмосферного давления.

Таблица 6

Прочность при сдвиге клеевых соединений, изготовленных прессовым методом

Склеиваемые материалы	Способ обработки	Прочность при сдвиге, МПа, при температуре испытаний, °С		
		20	120	150
ПКМ на основе препрега КМКС-2м.120.Т10	Без обработки	14,9	14,3	—
	Пескоструйный	20,4	19,4	
	ПАД	26,7	24,3	
	Химический	22,5	21,6	
ПКМ на основе препрега КМКС-4м.175.Т64	Без обработки	12,2	—	10,3
	Пескоструйный	20,5		19,5
	ПАД	26,2		24,3
	Химический	23,3		21,9
ПКМ на основе препрега КМКС-2м.120.Т10 + Д16-АТ	Без обработки	13,9	11,8	—
	Пескоструйный	22,3	21,0	
	ПАД	26,4	23,9	
	Химический	22,8	21,1	
ПКМ на основе препрега КМКС-4м.175.Т64 + Д16-АТ	Без обработки	13,5	—	10,6
	Пескоструйный	21,4		20,0
	ПАД	27,0		24,5
	Химический	24,1		22,7

Примечание. ПАД – плазма атмосферного давления.

Эффективность выбранных (химический и с использованием ПАД) способов подготовки поверхности образцов из ПКМ на основе клеевых препрегов марок КМКС-2м.120.Т10 и КМКС-4м.175.Т64 сохраняется в случае изготовления клеевых образцов в опытном производстве: прочность клеевых соединений в сравнении с необработанной и обработанной механическим (пескоструйным) способом поверхностями существенно (не менее чем на 20 %) увеличивается в диапазоне температур от 20 до 150 °С.

Заключения

На основании анализа научно-технической и патентной информации выявлено, что в настоящее время наиболее современным и эффективным способом подготовки поверхности ПКМ, обеспечивающим реализацию максимальной прочности клеевых соединений, является обработка химическими составами или с использованием ПАД.

Исследовано влияние рецептуры химических составов на эффективность обработки поверхности образцов ПКМ из клеевых препрегов КМКС-2м.120.Т10 и КМКС-4м.175.Т64 по таким параметрам, как шероховатость и КУС. Установлено, что выбранные химические составы вызывают протравливание поверхности ПКМ, тем самым увеличивая шероховатость и снижая КУС.

Показано, что обработка поверхности ПКМ из клеевых препрегов КМКС-2м.120.Т10 и КМКС-4м.175.Т64 химическим составом с оптимальной рецептурой или с использованием ПАД обеспечивает более высокий уровень прочности клеевых соединений в сравнении с необработанной и обработанной механическим способом поверхностями. Эффективность выбранных способов подготовки поверхности ПКМ сохраняется в случае изготовления клеевых образцов в опытном производстве.

Список источников

1. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 25–35.

2. Каблов Е.Н., Минаков В.Т., Аниховская Л.И. Клеи и материалы на их основе для ремонта конструкций авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. № 1. С. 61–65.
3. Куцевич К.Е. Клеевые препреги и углекомпози́ты на их основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 19 с.
4. 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.
5. Петрова А.П., Донской А.А. Клеящие материалы. Герметики. СПб.: Проффессионал, 2008. 589 с.
6. Алямовский А.И., Земцова Е.В., Копыл Н.И., Объедков М.Л. Результаты экспериментальных исследований влияния различных способов подготовки поверхности крупногабаритных конструкций из углепластиков на характеристики прочности клеевых соединений // *Космическая техника и технологии*. 2023. № 2 (41) С. 54–64.
7. Del Real Jc., Ballesteros Y., Chamochin R. et al. Influence of surface preparation on the fracture behavior of acrylic adhesive/CFRP composite joints // *The Journal of Adhesion*. 2011. Vol. 87 (4). P. 366–381.
8. Отслаивающийся слой, способ подготовки поверхности и склеивания композитных конструкций с его использованием: пат. AU 2016256666; заявл. 07.11.16; опубл. 18.01.18.
9. Методы и устройства для ремонта композитных материалов: пат. US 10213964 B2; заявл. 08.05.15; опубл. 26.02.19.
10. Rotel M., Zahavi J., Tamir S. et al. Pre-bonding technology based on excimer laser surface treatment // *Applied Surface Science*. 2000. Vol. 154–155. P. 610–616.
11. Изменение поверхностной энергии с помощью прямого лазерного абляционного текстурирования поверхности: пат. US 10259077 B2; заявл. 24.03.15; опубл. 16.04.19.
12. Лазерная наноструктурированная обработка поверхности для соединения материалов: пат. US 11493070 B2; заявл. 24.09.19; опубл. 08.11.22.
13. Способ подготовки поверхности полимерных материалов к склеиванию: пат. RU 2126810 C1 Рос. Федерация; заявл. 01.08.97; опубл. 27.02.99.
14. Краус Э., Баудрит Б., Хаидемаиер П. и др. Обработка поверхности полимеров ультрафиолетовым лазером для улучшения качества склеивания // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2015. № 8. С. 24–31.
15. Способ обработки поверхности композитных материалов с помощью плазменных пучков атмосферного давления: пат. СА 2624565С; заявл. 30.09.05; опубл. 12.04.07.
16. 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). С. 40–50. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.
17. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 82–92. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
18. Салахова Р.К., Вешкин Е.А., Судьин Ю.И., Баранников А.А. Влияние шероховатости на поверхностно-энергетические характеристики и смачиваемость стеклопластика // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 2 (79). С. 48–58. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-48-58.
19. 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). С. 61–75. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-61-75.

20. Некрасов И.К., Абдуллин И.Ш., Сагитова Ф.Р. Повышение прочностных характеристик композиционного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с помощью модификации плазмой высокочастотного емкостного разряда пониженного давления // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 2 (79). С. 114–127. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-114-127.
21. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Аниховская Л.И. Клеящие материалы в конструкции лопастей вертолетов // *Труды ВИАМ*. 2016. № 7 (43). С. 58–66. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-7-7.

References

1. Sibileva S.V., Karimova S.A. Surface treatment of titanium alloys to provide adhesion properties. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. S2, pp. 25–35.
2. Kablov E.N., Minakov V.T., Anikhovskaya L.I. Adhesives and materials based on them for the repair of aircraft structures. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2002, no. 1, pp. 61–65.
3. Kutsevich K.E. *Adhesive prepregs and carbon composites based on them*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2014, 19 p.
4. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
5. Petrova A.P., Donskoy A.A. *Adhesive materials. Sealants*. St. Petersburg: Professional, 2008, 589 p.
6. Alyamovsky A.I., Zemtsova E.V., Kopyl N.I., Obedkov M.L. Results of experimental studies of the influence of various methods of preparing the surface of large structures made of carbon fiber on the strength characteristics of adhesive joints. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2023, no. 2 (41), pp. 54–64.
7. Del Real Jc., Ballesteros Y., Chamochin R. et al. Influence of surface preparation on the fracture behavior of acrylic adhesive/CFRP composite joints. *The Journal of Adhesion*, 2011, vol. 87 (4), pp. 366–381.
8. *Peeling layer, a method of surface preparation and bonding of composite structures using it*: pat. AU 2016256666; appl. 07.11.16; publ. 18.01.18.
9. *Methods and devices for repairing composite materials*: pat. US 10213964 B2; appl. 08.05.15; publ. 26.02.19.
10. Rotel M., Zahavi J., Tamir S. et al. Pre-bonding technology based on excimer laser surface treatment. *Applied Surface Science*, 2000, vol. 154–155, pp. 610–616.
11. *Modifying surface energy using direct laser ablative surface texturing*: pat. US 10259077 B2; appl. 24.03.15; publ. 16.04.19.
12. *Laser nanostructured surface treatment for joining materials*: pat. US 11493070 B2; appl. 24.09.19; publ. 08.11.22.
13. *Method of preparing the surface of polymeric materials for gluing*: pat. RU 2126810 C1 Rus. Federation; appl. 01.08.97; publ. 27.02.99.
14. Kraus E., Baudrit B., Heidemaier P. et al. Surface treatment of polymers with ultraviolet laser to improve the quality of adhesion. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2015, no. 8, pp. 24–31.
15. *Method for surface treatment of composite materials using atmospheric pressure plasma beams*: pat. CA 2624565C; appl. 30.09.05; publ. 12.04.07.
16. 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), pp. 40–50. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 07, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.
17. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 82–92. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 07, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.

18. Salakhova R.K., Veshkin E.A., Sudin Yu.I., Barannikov A.A. Effect of roughness on surface-energy characteristics and wetting properties of fiberglass. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), pp. 48–58. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 07, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-48-58.
19. 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), pp. 61–75. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 07, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-61-75.
20. Nekrasov I.K., Abdullin I.Sh., Sagitova F.R. Increase of strength characteristics of composite material on the basis of UHMWPE fabric by means of modification with CCP plasma of low-pressure discharge. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), pp. 114–127. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 07, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-114-127.
21. 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, pp. 58–66. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 19, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-7-7.

Информация об авторах

Рубцова Екатерина Владимировна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Балабанова Ольга Сергеевна, инженер 2 категории, 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

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

Лукина Наталия Филипповна, главный научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ekaterina V. Rubtsova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga S. Balabanova, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Natalia F. Lukina, Chief Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.06.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.06.2026.

The article was submitted 17.06.2026; approved and accepted for publication after reviewing 29.06.2026.