

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-96-107

ПЕРСПЕКТИВНОЕ ЭПОКСИДНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ МАРКИ ВСЭ-81 ДЛЯ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

Я.А. Вахрушева¹, А.И. Ткачук¹, Е.А. Афанасьева¹, Е.В. Куршев¹, С.Л. Лонский¹

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

Аннотация. Рассмотрены технологические и эксплуатационные характеристики связующего ВСЭ-81, разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Приведены результаты гелеобразования и реологических испытаний. Получены механические показатели при растяжении образцов связующего ВСЭ-81, отвержденных по выбранному режиму, а методом дифференциальной сканирующей калориметрии определена степень их конверсии. Проведено сравнение механических характеристик микропластиков, полученных на основе углеродного волокна UMT49S-12K-EP со связующим ВСЭ-81 и его импортным аналогом. Представлены результаты микроструктурных исследований, интерпретируемых с помощью модели микрокомпозитного строения термореактивных полимеров.

Ключевые слова: эпоксидные связующие, полимерные композиционные материалы, микропластики, испытание углеродных волокон

Для цитирования: Вахрушева Я.А., Ткачук А.И., Афанасьева Е.А., Куршев Е.В., Лонский С.Л. Перспективное эпоксидное связующее марки ВСЭ-81 для входного контроля качества углеродного волокна // Труды ВИАМ. 2026. № 6 (160). С. 96–107. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-96-107.

Scientific article

PERSPECTIVE EPOXY RESIN SYSTEM VSE-81 FOR INCOMING QUALITY INSPECTION OF CARBON FIBER

Ya.A. Vakhrusheva¹, A.I. Tkachuk¹, E.A. Afanaseva¹, E.V. Kurshev¹, S.L. Lonskii¹

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

Abstract. In the study the technological and operational characteristics of the epoxy resin system VSE-81, developed at the NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, are considered. The results of gelation and rheological tests are presented. Mechanical properties are obtained by stretching VSE-81 samples cured according to the selected mode, and the conversion rate is determined by the DSC method. We compared the mechanical characteristics of microplastics based on UMT49S-12K-EP carbon fiber with VSE-81 binder and its imported analogue. The results of microstructural research interpreted using a model of the microcomposite structure of thermosetting polymers are presented.

Keywords: epoxy resin system, polymeric composite materials, microplastics, testing of carbon fibers

For citation: Vakhrusheva Ya.A., Tkachuk A.I., Afanaseva E.A., Kurshev E.V., Lonskii S.L. Perspective epoxy resin system VSE-81 for incoming quality inspection of carbon fiber. *Trudy VIAM*, 2026, no. 6 (160), pp. 96–107. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-96-107.

Введение

Мировой рынок демонстрирует значительный рост спроса на углеродное волокно в авиационной, аэрокосмической и энергетических отраслях, в сфере автомобилестроения и производства спортивного инвентаря благодаря его уникальным свойствам: высокому соотношению прочности и массы, устойчивости к коррозии и долговечности. В авиационной отрасли малая плотность изделия обеспечивает повышенную топливную экономичность, что приводит к снижению эксплуатационных расходов и выбросов парниковых газов. В аэрокосмической отрасли углеродное волокно используется в конструктивных элементах для уменьшения массы и увеличения прочности и топливной эффективности [1–4]. Высокая прочность при разрыве, долговечность и усталостная стойкость углеродных волокон делают их идеальными материалами для критически важных компонентов систем возобновляемой энергетики. Основные факторы роста рынка – растущий спрос на высокопроизводительные и легкие композиционные материалы, а также повышенные требования к эксплуатационным характеристикам в конечных продуктах [3–6].

Так, объем мирового рынка углеродного волокна в 2023 г. составил 2,65 млрд долларов США. По прогнозам он вырастет до 6,54 млрд долларов США к 2032 г., а среднегодовой темп роста составит 11,1 % в течение прогнозируемого периода благодаря растущему спросу в автомобильном и аэрокосмическом секторах, а также крупным инвестициям в научно-исследовательские разработки в области компонентов на основе углерода и в производство углеродного волокна для самолетов. В 2023 г. на рынке углеродного волокна доминировал Азиатско-Тихоокеанский регион с долей рынка 36,6 %, что обусловлено быстрым ростом промышленности, увеличением объемов производства автомобилей и инвестициями в инфраструктуру Китая, Индии и Юго-Восточной Азии.

В России до конца 2030 г. ожидается рост производства готовых изделий на основе углеродного волокна до 43,1 млрд руб. К отечественным предприятиям, специализирующимся на производстве углеродного волокна, относятся компании ООО «Аргон» (Саратовская обл., г. Балаково) и ООО «ЗУКМ» (Челябинская обл., г. Челябинск), которые разрабатывают композиционные материалы для Госкорпорации «Росатом» [7].

Следует отметить значительный рост производства углеродных волокон благодаря компании ООО «Алабуга-Волокно», которая входит в состав дивизиона «Перспективные материалы и технологии» Госкорпорации «Росатом» в особой экономической зоне «Алабуга» (Республика Татарстан). Компания производит стандартное и высокомодульное углеродное волокно на основе отечественного полиакрилонитрильного волокна (ПАН) с 2015 г. [7].

Производство углеродного волокна – это сложный и высокотехнологичный процесс, требующий пристального внимания к деталям для обеспечения требуемого качества продукции. В зависимости от типа исходного сырья и технологии его переработки полученные свойства углеродных волокон могут значительно отличаться, поэтому необходимо проводить строгий входной и выходной контроль качества углеродного жгута. Таким образом, до изготовления ответственных деталей необходимо выявлять потенциальные дефекты и отклонения, которые могут повлиять на монолитность и механическую прочность изделий из полимерных композитов [8, 9].

При производстве углеродного волокна используются различные методы контроля – от визуального осмотра до более автоматизированных технологий (ультразвуковой и рентгеновский контроль). При визуальном осмотре поверхность углеродного волокна тщательно изучается на предмет наличия дефектов, таких как пустоты, расслоения или поверхностные дефекты. Данные методы позволяют проводить экспресс-исследования качества получаемого материала в процессе его изготовления на линии.

Помимо этих методов проверки, на протяжении всего процесса производства углеродного волокна применяются и другие меры контроля качества для обеспечения стабильности и точности. К ним относятся контроль температуры и уровня влажности в производственном помещении, а также соблюдение строгих стандартов контроля качества сырья, используемого в процессе производства [3, 10–14].

Одним из основных методов испытания углеродного волокна, позволяющим определить работоспособность изготовленного материала, является исследование его прочностных характеристик [15, 16].

Прочность углеродных волокон проверяют в исследовательских лабораториях при проведении испытаний на растяжение, при которых измеряют напряжение, необходимое для разрушения материала, и вычисляют предел прочности и модуль упругости (согласно зарубежным или отечественным стандартам ASTM D 3039, ISO 10618:2004 или ГОСТ Р ИСО 10618–2012) [17]. Эти испытания позволяют определить, насколько волокнистый материал способен выдерживать нагрузки до разрушения и насколько он деформируется при приложении силы.

Существуют разные методики изготовления и испытания образцов углепластиков на механическую прочность. Однако при изготовлении укрупненных плит наблюдаются заниженные показатели прочностных характеристик по отношению к значениям прочности на моножгутах, а также происходит усреднение имеющихся характеристик в объеме изготовленного образца. Таким образом, характеристики, полученные на образцах, которые были вырезаны из углепластика, позволяют получить комплексный набор данных и спрогнозировать поведение материала в изделии, но не свойства самого моноволокна [18].

В случае использования метода мокрой намотки из моножгута для изготовления микропластика благодаря формированию равномерно пропитанных и отвержденных нитей углеродного волокна низковязкими связующими удастся реализовать его максимальные рабочие характеристики. Кроме того, появляется возможность проверки качества углеродного волокна на любом участке, что позволит корректировать технологический процесс его изготовления при термической обработке ПАН-волокна.

Несмотря на широкую распространенность метода намотки для изготовления изделий из полимерных композитов, намотка микропластика для испытания на определение прочности, модуля упругости и предельного удлинения при растяжении углеродных нитей не является стандартной или строго документированной процедурой. Данный факт объясняется следующими причинами:

- необходимостью использования узкоспециализированного оборудования для получения микропластиков, которое будет обеспечивать соблюдение ряда параметров, таких как температура пропитки, угол наклона и натяжение волокон, скорость намотки волокна, размер диаметра отверстия в фильтре и др.;

- выбором связующего, которое должно обладать низкой исходной вязкостью, длительной технологической жизнеспособностью, удобным режимом отверждения, высокой адгезией к углеродному волокну, обеспечивать максимальную реализацию упругопрочностных свойств волокна и обладать показателем удлинения, превышающим удлинение волокна в 2 раза [18].

В настоящее время для изготовления микропластиков производители углеродных волокон используют различные виды полимерных связующих, в число которых до недавнего времени входило эпоксидное связующее Araldite LY 556/Aradur 917/Accelerator DY 070 производства компании Huntsman (США). В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработано отвечающее всем современным требованиям

эпоксидное связующее марки ВСЭ-81 (ТУ 20.14.63-211-07545412–2024) с высоким показателем удлинения при разрыве не менее 5 % (среднее значение) и температурой отверждения ≤ 75 °С.

Разработанное эпоксидное связующее соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 10618–2012: вязкость связующего при пропитке < 1 Па·с, а деформация отвержденного связующего при разрыве в 2 раза больше, чем у углеродной нити [19].

Созданное эпоксидное связующее позволит решить проблему выбора полимерной матрицы при изготовлении микропластиков для проведения испытаний на определение прочности и модуля упругости при растяжении, а также удлинения при разрыве углеродных волокон. В свою очередь это позволит унифицировать связующее для всех производителей углеродных волокон, снизить зависимость от иностранных поставщиков и получать корректные сравнительные данные механических испытаний у производителей.

В данной работе приводятся сравнительные технологические и эксплуатационные характеристики связующих ВСЭ-81 и производства компании Huntsman (США), показаны микроструктурные и фрактографические особенности разрушения образцов микропластиков на основе этих связующих.

Для оценки микроструктуры эпоксидных микропластиков, а также для изучения особенностей их разрушения при силовом воздействии на растяжение проведены исследования с применением сканирующей электронной микроскопии [20–24]. Показаны микроструктурные и фрактографические особенности разрушения образцов микропластиков на основе связующих ВСЭ-81 и импортного аналога.

Материалы и методы

В данной работе использовано эпоксидное связующее марки ВСЭ-81 (ТУ 20.14.63-211-07545412–2024) производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Связующее отверждали до формообразования, а затем выдерживали при температуре 75 °С до достижения нужных качественных характеристик.

Реологические испытания образцов связующего ВСЭ-81 проводили с использованием ротационного вискозиметра при различных температурах в соответствии с ГОСТ 25271–93 [25].

Продолжительность гелеобразования определяли на гель-таймере при различных температурах с навеской связующего массой 12 г.

Тепловой эффект реакции и температуру стеклования определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на дифференциальном сканирующем калориметре с интервалом рабочих температур от -100 до $+400$ °С и диапазоном скоростей нагрева от 1 до 20 °С/мин в атмосфере продувочного газа аргона (100 мл/мин). Испытания проводили в соответствии с ГОСТ Р 55134–2012 [26].

Прочность при растяжении отвержденных образцов связующего ВСЭ-81 определяли на испытательной машине по ГОСТ 11262–2017 при температуре 20 °С. Испытание проводили при скорости траверсы 5 мм/мин [18].

Для изготовления образцов микропластика использовали лабораторный стенд, состоящий из бобинодержателя, подогреваемой пропиточной ванны с регулируемой температурой, фильеры с фиксированным размером выходного отверстия для отжима излишков связующего с поверхности волокна, приемной металлической рамки для намотки пропитанного связующим углеродного волокна. При этом для изготовления образцов соблюдался один режим скорости намотки углеродного волокна на приемочную раму 1 м/мин.

После окончания пропитки рамку с пропитанным углеродным жгутом помешали в сушильный шкаф и отверждали с конечной температурой отверждения 75 °С в течение 6 ч.

По окончании пропитки образцы микропластика визуально осматривали и проводили отбраковку образцов (по ГОСТ Р ИСО 10618–2012) по внешним признакам при наличии следующих дефектов: порванных нитей, капель смолы, несоосности волокон относительно продольной оси и непропитанных участков на углеродном волокне [17].

Отобранные образцы микропластиков заливали в полимерные накладки для снижения контактных нагрузок в процессе механических испытаний.

При изготовлении микропластиков использовали углеродное волокно UMT49S-12K-EP и эпоксидные связующие производства компании Huntsman (США) и ВСЭ-81 (НИИ «Курчатовский институт» – ВИАМ). Полученные микропластики на различных связующих подвергали силовому растяжению по ГОСТ Р ИСО 10618–2012 [17].

Структуру образцов микропластиков до и после механического воздействия исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа по специальной методике, позволяющей получать данные структуры материала в высоком разрешении. Для выявления тонкой структуры исследуемых образцов применяли ионно-плазменное травление по выбранному режиму в вакуумной установке.

Проводили напыление на поверхность образцов микропластиков тонкого слоя электропроводящего покрытия, которое позволяет уменьшить влияние эффектов электрической зарядки при воздействии пучка электронов в микроскопе. Для проведения микроструктурных исследований применяли сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения. Исследования проводили при вторичных электронах и увеличении до $\times 40000$.

Результаты и обсуждение

Одно из основных требований для связующих, перерабатываемых методами намотки, – низкий показатель исходной вязкости (до 1 Па·с) и длительное время сохранения вязкости (не менее 3 ч) при температуре пропитки. Это необходимо, чтобы армирующий волокнистый наполнитель (особенно в случае изготовления крупногабаритного изделия) можно было полностью пропитать до того, как связующее станет слишком вязким для соблюдения равномерного пропитывания углеродного жгута.

В табл. 1 представлены зависимости реологических характеристик связующего от температуры и времени.

Таблица 1

Значения вязкости и времени гелеобразования связующего марки ВСЭ-81

Температура, °С	Время сохранения вязкости, мин	Вязкость, Па·с	Время гелеобразования, мин
25	0	0,18	507
	90	0,42	
	180	0,80	
45	0	0,05	259
75	0	0,02	40
95	0	0,01	27

Видно, что связующее ВСЭ-81 имеет низкое значение исходной вязкости (не более 0,2 Па·с) при комнатной температуре и медленную скорость нарастания вязкости, что обеспечивает длительную технологическую жизнеспособность эпоксидной композиции при комнатной температуре (>3 ч).

При повышении температуры до 45 °С показатель вязкости снижается с 0,2 до 0,05 Па·с, дальнейшее увеличение температуры не дает значительного снижения вязкостных характеристик, однако при температуре 95 °С наблюдается резкое увеличение реакционной способности и гелеобразование сокращается до 27 мин.

Таким образом, разработанное связующее ВСЭ-81 позволяет пропитывать углеродное волокно методом намотки без привлечения дополнительного термостатируемого оборудования, а процесс отверждения можно провести при температуре 75 °С, что соответствует требованию ГОСТ Р ИСО 10618–2012, согласно которому при пропитке вязкость связующего не должна превышать 1 Па·с [17].

Для подтверждения полученного оптимального режима отверждения методом ДСК проведено исследование влияния температурного режима на степень конверсии связующего ВСЭ-81 (табл. 2).

Таблица 2

Свойства отвержденных и неотвержденных образцов, полученные методом ДСК

Состояние связующего ВСЭ-81	Наименование ДСК-характеристики			
	Температура стеклования, °С	Температура пика реакции отверждения (доотверждения), °С	Нормированный тепловой эффект реакции отверждения (доотверждения), Дж/г	Степень отверждения, %
До отверждения	–	113	490,23	–
После отверждения при 75 °С	70	176	10	98

Исследования методом ДСК показали, что связующее ВСЭ-81 полностью отверждается по режиму с температурой конечной ступени 75 °С, остаточный тепловой эффект не превышает 10 Дж/г, что обеспечивает получение степени отверждения не менее 98 %.

Для определения механических показателей при растяжении изготовлены отливки отвержденных образцов связующего ВСЭ-81 (табл. 3).

Таблица 3

Результаты испытаний при растяжении отвержденных образцов эпоксидного связующего ВСЭ-81

Образцы	Модуль упругости, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
Связующее ВСЭ-81	3,6	79,2	5,7

Видно, что отвержденные образцы эпоксидного связующего ВСЭ-81 имеют показатель удлинения при растяжении >5 %, что в 2 раза больше, чем у углеродного волокна UMT49S-12K – не менее 1,8 %. Таким образом, разработанное связующее по формальным признакам полностью удовлетворяет требования ГОСТ 11262–2017 и может использоваться для проверки серийно выпускаемого углеродного волокна [18].

Для проверки возможности использования связующего ВСЭ-81 изготовлены образцы микропластиков на основе углеродного волокна марки UMT49S-12K-EP, а также импортного эпоксидного связующего (табл. 4).

Механические характеристики образцов микропластиков на основе углеродного волокна UMT49S-12K-EP со связующим ВСЭ-81 и эпоксидной системой производства компании Huntsman

Образец углеродного волокна UMT49S-12K-EP и связующего	Модуль упругости, ГПа	Прочность при растяжении, ГПа	Относительное удлинение при разрыве, %
Марки ВСЭ-81	257	5,15	2,0
Эпоксидной системы компании Huntsman	256	5,15	2,0
Технические характеристики углеродного волокна*	260	4,90	1,8

* Данные взяты с сайта gosatom-composites.ru.

На основании полученных данных видно, что разработанное связующее ВСЭ-81 не уступает по свойствам эпоксидной системе компании Huntsman на углеродных волокнах и позволяет провести испытания углеродного волокна на прочность и модуль упругости при растяжении, а также предельное удлинение.

Методом сканирующей электронной микроскопии проведены микроструктурные исследования внешних поверхностей (без испытания) и поверхностей разрушения после испытания на растяжение изготовленных микропластиков.

Представленные в данной статье результаты микроструктурных исследований можно интерпретировать с помощью модели микрокомпозитного строения терморезактивных полимеров [19, 22, 24, 27].

На рис. 1 приведена микроструктура внешних поверхностей микропластиков на основе связующих производства компании Huntsman и ВСЭ-81. Показана микрофазовая структура матрицы на границе раздела с углеродными волокнами, которая имеет типичное строение для полимерных матриц [19]. Видно, что импортное связующее и связующее ВСЭ-81 имеют однородную, однофазную структуру без микродефектов, что, в свою очередь, свидетельствует о предсказуемых изотропных свойствах. Отсутствие концентраторов напряжений в виде неоднородностей и микродефектов не будет влиять на результаты испытаний микропластиков при силовом нагружении.

В обоих случаях наблюдается четкая граница раздела между углеродным волокном и полимерной матрицей. Непосредственно на границе «волокно–матрица» зафиксирована перпендикулярная ориентация агрегатов микродисперсных частиц матрицы вдоль оси волокна, вызванная химической природой связующего и наполнителя [28]. Выявлено наличие тонкой пленки матрицы на поверхностях углеродных волокон. Полученные микроструктуры внешней поверхности микропластиков на основе связующих производства компании Huntsman и ВСЭ-81 свидетельствуют о высокой смачиваемости углеродных волокон исследуемыми связующими.

При фрактографическом анализе микропластиков, испытанных на растяжение, выявлено, что разрушение композитов происходит с фрагментацией полимерной матрицы между углеродными волокнами с образованием торсионов (рис. 2). Под торсионом понимается локальная область вращения, возникающая в нагруженном полимере или матрице композита при больших градиентах деформации [28].

В микропластике на основе импортного полимерного связующего в матрице между волокнами образуются торсионы первого порядка (рис. 2, а–в).

В микропластике на основе связующего ВСЭ-81 (рис. 2, г–е) фрагментация полимерной матрицы между волокнами происходит с образованием множественных торсионов первого и второго порядка, что указывает на высокую адгезию матрицы на границе с углеродным волокном [28–32].

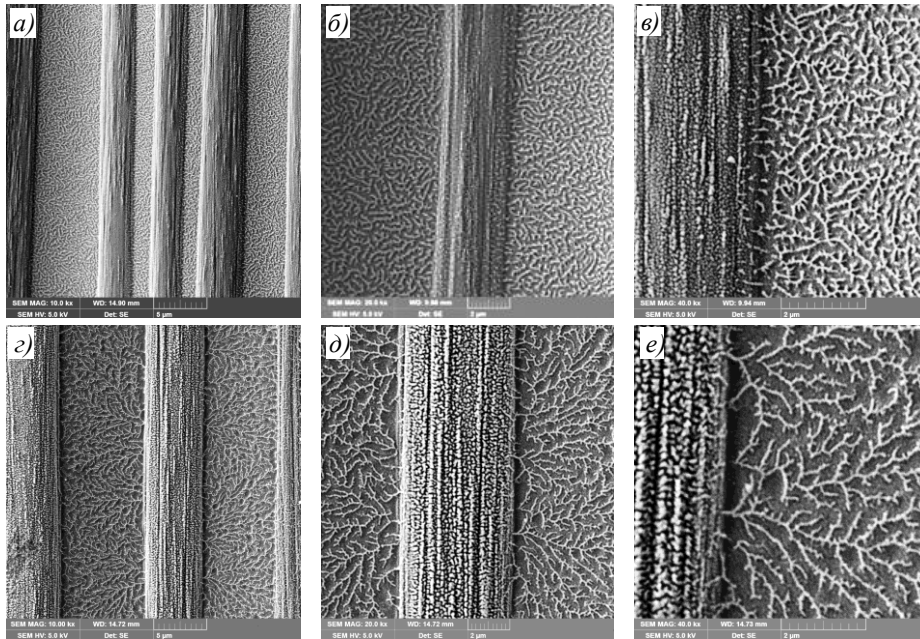


Рис. 1. Микроструктура (*a, c* – $\times 10000$; *b, d* – $\times 20000$; *e, e* – $\times 40000$) внешней поверхности микропластиков на основе связующих производства компании Huntsman (*a–b*) и ВСЭ-81 (*c–e*), наполненных углеродными волокнами

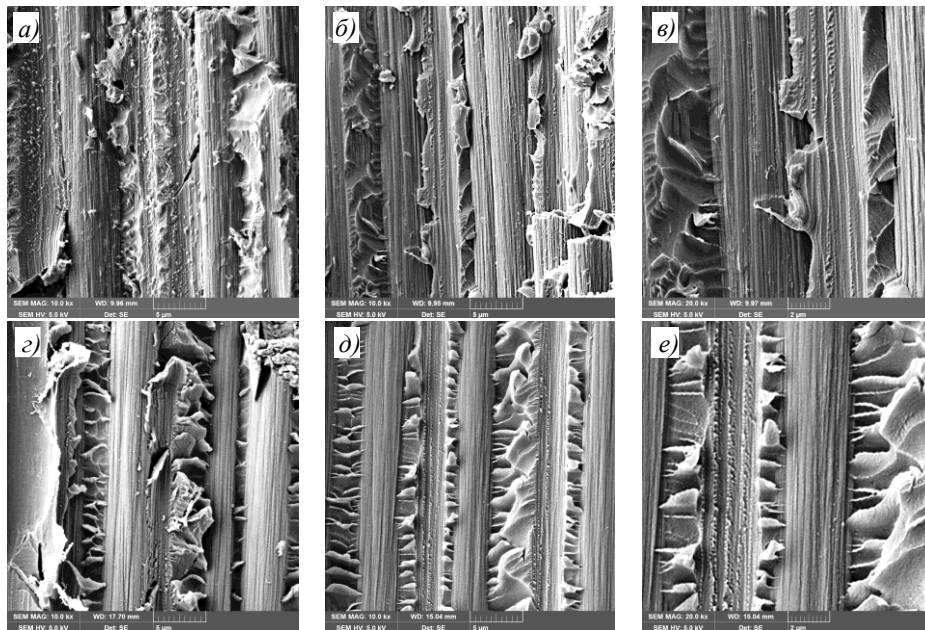


Рис. 2. Микроструктура (*a, c* – $\times 10000$; *b, d* – $\times 20000$; *e, e* – $\times 40000$) поверхности разрушения микропластиков после испытания на растяжение на основе связующих производства компании Huntsman (*a–b*) и ВСЭ-81 (*c–e*), наполненных углеродными волокнами

Заключения

В работе рассмотрены технологические и эксплуатационные характеристики связующего ВСЭ-81, разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, в сравнении с импортным аналогом. Подробно исследована возможность использования материала при изготовлении микропластиков для проведения испытаний на определение прочности и модуля упругости при растяжении, а также удлинения при разрыве углеродных волокон. По результатам исследования реологических характеристик видно, что связующее ВСЭ-81 позволяет пропитать углеродное волокно методом

намотки без привлечения дополнительного термостатируемого оборудования и обеспечивает длительную технологическую жизнеспособность.

Методом ДСК исследованы процессы отверждения связующего и подтверждена высокая степень конверсии при температуре 75 °С.

Результаты механических исследований образцов связующего и микропластиков на основе углеродного волокна UMT49S-12K-EP показывают, что связующее ВСЭ-81 соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 10618–2012 и не уступает по свойствам импортному аналогу.

Микроструктурные исследования показали высокую смачиваемость поверхностей углеродных волокон в микропластиках на основе связующих производства компании Huntsman и ВСЭ-81. Разрушение микропластиков подчиняется единому механизму.

Список источников

1. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
2. Путилина П.М., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стеклянных волокон для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов и перспективы их развития // *Труды ВИАМ*. 2023. № 8 (126). С. 85–99. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-85-99.
3. Park S.-J. *Carbon Fibers*. Singapore: Springer Verlag, 2019. 358 p.
4. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Гуняева А.Г., Курносов А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1 (95). С. 43–53. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
6. Валуева М.И., Евдокимов А.А., Клименко О.Н., Начаркина А.В. Углепластики в конструкциях изделий космической техники (обзор) // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2022. № 1. С. 12–21.
7. Анализ российского рынка ПКМ на основе углеродного волокна // *Межрегиональный промышленный кластер «Композиты без границ»*. URL: <http://www.compositescluster.ru/documentation/> (дата обращения: 15.08.2025).
8. Валуева М.И., Зеленина И.В., Мишуров К.С., Гуляев И.Н. Обзор публикаций по разработкам лопаток из полимерных композиционных материалов для вентилятора авиационного двигателя // *Вестник машиностроения*. 2019. № 2. С. 34–41.
9. Варшавский В.Я. *Углеродные волокна*. М.: Наука, 2005. 496 с.
10. Молчанов Б.И., Гудимов М.М. Свойства углепластиков и область их применения // *Авиационная промышленность*. 1997. № 3–4. С. 58–60.
11. Ерасов В.С., Сibaев И.Г., Сутубалов А.И., Попкова Е.А., Горбовец М.А. Методики механических испытаний по определению прочности углеродных волокон // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). С. 137–148. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-137-148.
12. Ерасов В.С., Конопленко В.П., Пирогов Е.Н. Влияние базы образца на прочность углеродных волокон // *Физика и механика деформации и разрушения*. 1978. Вып. 5. С. 48–53.
13. Гиннэ С.В. К вопросу о полимерных композиционных материалах на основе углеродных волокон // *Механика XXI века*. 2022. № 21. С. 235–241.
14. Колобков А.С., Малаховский С.С. Развитие технологий производства углеродных волокон (обзор) // *Химические волокна*. 2020. № 1. С. 3–7.
15. Малаховский С.С., Панафидникова А.Н., Костромина Н.В., Осипчик В.С. Углепластики в современном мире: их свойства и применения // *Успехи в химии и химической технологии*. 2019. Т. 33. № 6 (216). С. 62–64.

16. Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров. М.: Лабиринт, 1994. 367 с.
17. ГОСТ Р ИСО 10618–2012 (ISO 10618:2004, ASTM D 3039). Волокно углеродное. Метод определения механических свойств пропитанных смолой нитей при растяжении. М.: Стандартиформ, 2015. 23 с.
18. ГОСТ 11262–2017 (ISO 527-2:2012). Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартиформ, 2018. 26 с.
19. Механика разрушения. Разрушение материалов. Пер. с англ. / под ред. Р.В. Гольдштейна. М.: Мир, 1979. 240 с.
20. Деев И.С., Кобец Л.П. Фрактография эпоксидных полимеров // Высокомолекулярные соединения. Сер.: А. 1996. Т. 38. № 4. С. 27–34.
21. Deev I.S., Kurshev E.V., Lonskii S.L., Nikishin E.F. The structure and composition of samples made of carbon-fiber-reinforced plastic KMU-41 exposed for 12 years on the exterior surface of the international space station: 1. Macrostructure and surface composition // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. Vol. 7. No. 6. P. 840–846.
22. Куршев Е.В., Лонский С.Л., Егоров Ю.А., Зеленина И.В. Исследование изменений микроструктуры и химического состава полиимидного углепластика после воздействия имитируемых эксплуатационных факторов // *Вопросы материаловедения*. 2024. № 4 (120). С. 88–102.
23. Куршев Е.В., Лонский С.Л., Деев И.С. Применение метода сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа для исследования неметаллических композиционных материалов // *Исследование конструкционных материалов и функциональных покрытий методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, методами рентгеноструктурного и рентгеноспектрального микроанализа: сб. материалов VIII Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат»*. М., 2016. Ч. 2. С. 1–13.
24. Зеленина И.В., Валуева М.И., Начаркина А.В., Куршев Е.В. Структура и свойства высокотемпературного углепластика на основе полиимидного связующего // *Труды ВИАМ*. 2023. № 3 (121). С. 13–28. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-13-28.
25. ГОСТ 25271–93 (ISO 2555:1989). Пластмассы. Смолы жидкие, эмульсии или дисперсии. Определение кажущейся вязкости по Брукфильду. М.: Изд-во стандартов, 1994. 15 с.
26. ГОСТ Р 55134–2012 (ISO 11357-1:2009). Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 1. Общие принципы. М.: Стандартиформ, 2014. 26 с.
27. Вешкин Е.А., Славин А.В., Постнова М.В., Апалькова А.В. Роль температурно-временных условий отверждения в формировании свойств однонаправленного и равнопрочного углепластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 2 (79). С. 59–71. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.
28. Зеленина И.В., Гуляев И.Н., Кучеровский А.И., Мухаметов Р.Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора // *Труды ВИАМ*. 2016. № 2 (38). С. 64–71. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
29. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // *Труды ВИАМ*. 2014. № 7. С. 35–50. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
30. Деев И.С., Кобец Л.П. Исследование микроструктуры и особенностей разрушения эпоксидных полимеров и композитных материалов на их основе // *Материаловедение*. 2010. № 5. С. 8–16.
31. Деев И.С., Кобец Л.П. Исследование микроструктуры и особенностей разрушения эпоксидных полимеров и композитных материалов на их основе (окончание) // *Материаловедение*. 2010. № 6. С. 13–18.
32. Liu L., Du M., Liu F. Recent advances in interface microscopic characterization of carbon fiber-reinforced polymer composites // *Frontiers in Materials*. 2023. Vol. 10. P. 1–18.

References

1. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.

2. Putilina P.M., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu. Carbon fiber-reinforced and glass fiber-reinforced polymer composites for the manufacture of components for unmanned aerial vehicles and their developing prospects. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), pp. 85–99. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-85-99.
3. Park S.-J. *Carbon Fibers*. Singapore: Springer Verlag, 2019, 358 p.
4. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 18, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aerospace engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), pp. 43–53. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
6. Valueva M.I., Evdokimov A.A., Klimenko O.N., Nacharkina A.V. Carbon fiber-reinforced plastics in spacecraft designs (review). *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2022, no. 1, pp. 12–21.
7. Analysis of the Russian carbon fiber-based polymer composites market. *Interregional industrial cluster «Composites without Borders»*. Available at: <http://www.compositescluster.ru/documentation/> (accessed: August 15, 2025).
8. Valueva M.I., Zelenina I.V., Mishurov K.S., Gulyaev I.N. Review of publications on the development of blades made of polymer composite materials for aircraft engine fans. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2019, no. 2, pp. 34–41.
9. Varshavsky V.Ya. *Carbon fibers*. Moscow: Nauka, 2005, 496 p.
10. Molchanov B.I., Gudimov M.M. Properties of carbon fiber reinforced plastics and their scope of application. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1997, no. 3–4, pp. 58–60.
11. Erasov V.S., Sibayev I.G., Sutubalov A.I., Popkova E.A., Gorbovets M.A. Methods of mechanical testing to determine the strength of carbon fibers. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), pp. 137–148. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-137-148.
12. Erasov V.S., Konoplenko V.P., Pirogov E.N. Effect of the Sample Base on the Strength of Carbon Fibers. *Fizika i mekhanika deformatsii i razrusheniya*, 1978, is. 5, pp. 48–53.
13. Ginne S.V. On the Issue of Polymer Composite Materials Based on Carbon Fibers. *Mekhaniki XXI veku*, 2022, no. 21, pp. 235–241.
14. Kolobkov A.S., Malakhovsky S.S. Development of Carbon Fiber Production Technologies (review). *Khimicheskie volokna*, 2020, no. 1, pp. 3–7.
15. Malakhovsky S.S., Panafidnikova A.N., Kostromina N.V., Osipchik V.S. Carbon fiber reinforced plastics in the modern world: their properties and applications. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2019, vol. 33, no. 6 (216), pp. 62–64.
16. Gul V.E., Kuleznev V.N. *Structure and mechanical properties of polymers*. Moscow: Labirint, 1994, 367 p.
17. State Standard R ISO 10618–2012 (ISO 10618:2004, ASTM D 3039). *Carbon fiber. Method for determination of tensile mechanical properties of resin-impregnated yarns*. Moscow: Standartinform, 2015, 23 p.
18. GOST 11262–2017 (ISO 527-2:2012). *Plastics. Tensile test method*. Moscow: Standartinform, 2018, 26 p.
19. *Fracture Mechanics. Fracture of Materials*. Trans. from Engl. Ed. R.V. Goldstein. Moscow: Mir, 1979, 240 p.
20. Deev I.S., Kobets L.P. Fractography of Epoxy Polymers. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser.: A*, 1996, vol. 38, no. 4, pp. 27–34.
21. Deev I.S., Kurshev E.V., Lonskii S.L., Nikishin E.F. The structure and composition of samples made of carbon-fiber-reinforced plastic KMU-4l exposed for 12 years on the exterior surface of the international space station: 1. Macrostructure and surface composition. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2016, vol. 7, no. 6, pp. 840–846.
22. Kurshev E.V., Lonskiy S.L., Egorov Yu.A., Zelenina I.V. Study of changes in the microstructure and chemical composition of polyimide carbon fiber reinforced plastic after exposure to simulated operational factors. *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, no. 4 (120), pp. 88–102.

23. Kurshev E.V., Lonskiy S.L., Deev I.S. Application of scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis to study non-metallic composite materials. *Study of structural materials and functional coatings by optical, scanning and transmission electron microscopy, X-ray diffraction and X-ray spectral microanalysis: collection of materials of the VIII All-Rus. Conf. on testing and research of materials properties «TestMat»*. Moscow, 2016, part 2, pp. 1–13.
24. Zelenina I.V., Valueva M.I., Nacharkina A.V., Kurshev E.V. Structure and properties of high-temperature carbon fiber reinforced plastic based on polyimide binder. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), pp. 13–28. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-13-28.
25. State Standard 25271–93 (ISO 2555:1989). *Plastics. Liquid resins, emulsions, or dispersions. Determination of apparent viscosity by the Brookfield method*. Moscow: Publishing House of Standards, 1994, 15 p.
26. State Standard R 55134–2012 (ISO 11357-1:2009). *Plastics. Differential scanning calorimetry (DSC). Part 1. General principles*. Moscow: Standartinform, 2014, 26 p.
27. Veshkin E.A., Slavin A.V., Postnova M.V., Apalkova A.V. The role of temperature-time curing conditions in the formation of unidirectional and equally strong carbon fiber plastics properties. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), pp. 59–71. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.
28. Zelenina I.V., Gulyayev I.N., Kucherovskiy A.I., Mukhametov R.R. Heat-resistant CFRP for the impulse wheel of the centrifugal compressor. *Trudy VIAM*, 2016, no. 2 (38), pp. 64–71. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
29. Deev I.S., Kablov E.N., Kobets L.P., Chursova L.V. Research of the scanning electron microscopy method deformation of microphase structure of polymeric matrix at mechanical loading. *Trudy VIAM*, 2014, no. 7, pp. 35–50. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
30. Deev I.S., Kobets L.P. Study of the microstructure and fracture characteristics of epoxy polymers and composite materials based on them. *Materialovedenie*, 2010, no. 5, pp. 8–16.
31. Deev I.S., Kobets L.P. Study of the microstructure and fracture characteristics of epoxy polymers and composite materials based on them (conclusion). *Materialovedenie*, 2010, no. 6, pp.13–18.
32. Liu L., Du M., Liu F. Recent advances in interface microscopic characterization of carbon fiber-reinforced polymer composites. *Frontiers in Materials*, 2023, vol. 10, pp. 1–18.

Информация об авторах

Вахрушева Яна Андреевна, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ткачук Анатолий Иванович, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Афанасьева Евгения Александровна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куршев Евгений Васильевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лонский Станислав Леонардович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Yana A. Vakhrusheva, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anatoli I. Tkachuk, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgenia A. Afanaseva, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Stanislav L. Lonskii, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.01.2026.
The article was submitted 11.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 12.01.2026.