



Научная статья

УДК 67.02

DOI: 10.52957/2782-1900-2026-7-3-83-94

ВЛИЯНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПКМ

А. О. Мосов¹, С. Ю. Воронина¹, В. В. Власов²

Александр Олегович Мосов, магистрант; Светлана Юрьевна Воронина, канд. хим. наук, доц., Валерий Владимирович Власов, канд. тех. наук, доц.

¹ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 660037, Россия, г. Красноярск, проспект им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, simkina_svetlana@mail.ru

² ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», 150023, Россия, г. Ярославль, Московский пр., д. 88.

Ключевые слова:

ПКМ, эпоксидное связующее, углеродные нанотрубки, стабилизаторы, старение, прочность, электросопротивление.

Аннотация. В данной работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований по модификации полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе эпоксидного связующего ЭД-20 различными типами стабилизаторов. Изучено влияние концентрации термо- и УФ-стабилизаторов на физико-механические показатели и электрофизические характеристики ПКМ. В ходе анализа рассматриваются механизмы деструкции полимерной матрицы и роль стабилизирующих добавок в замедлении этих процессов. Выявлены закономерности изменения проводимости и диэлектрической проницаемости в зависимости от природы добавок. Показана возможность оптимизации рецептуры ПКМ для достижения баланса между стабильностью свойств во времени и требуемыми электрофизическими параметрами.

Для цитирования:

Мосов А.О., Воронина С.Ю., Власов В.В. Влияние стабилизаторов на физико-механические и электрофизические свойства ПКМ // От химии к технологии шаг за шагом. 2026. Т. 7, вып. 3. С. 83-94. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/7500/view>

Введение

В стратегически значимых сферах: авиастроении, промышленном и гражданском строительстве, а также в электротехнической и электронной промышленности полимерные материалы эксплуатируются в условиях жёсткого ультрафиолетового облучения и значительных перепадов температур [1]. Подобное воздействие приводит к снижению стабильности свойств, короблению элементов и ухудшению функциональных качеств материалов [2-4], что, в свою очередь, увеличивает вероятность аварийных ситуаций и требует дополнительных затрат на обслуживание и ремонт.



В поисках баланса между защитой и сохранением механики разработчики обращаются к технологиям поверхностного модифицирования (создание барьерных покрытий) [5] либо к применению фотостабильных композиций, в том числе и на эпоксидной основе [6]. Практика показывает, что создание физического барьера эффективно лишь до тех пор, пока покрытие сохраняет целостность: в подвижных механизмах оно быстро разрушается, открывая доступ деструктивным факторам. В свою очередь, устойчивые к УФ-смолы не являются панацеей: в реальных условиях эксплуатации (влажность, нагрев, инсоляция) в них неизбежно запускаются процессы старения, ведущие к снижению эксплуатационных характеристик [7]. Особый интерес представляет изучение электрофизических свойств, поскольку они чувствительны к структурным изменениям на молекулярном уровне и могут служить индикатором начала деструкции [8]. Кроме того, для многих областей применения (радиоэлектроника, кабельная техника) стабильность диэлектрических характеристик является критическим параметром.

На сегодняшний день защита изделий из полимерных материалов от деструкции осуществляется преимущественно за счет введения в состав материала антиоксидантов и стабилизаторов [10]. Данный подход обеспечивает комплексную защиту по всему объему изделия, эффективно противодействуя термоокислительной и фотохимической деградации, а также расширяя границы термической устойчивости. Главным компромиссом при таком решении становится потенциальное ухудшение физико-механических параметров [11].

Целью настоящей работы является изучение влияния различных типов термо- и УФ-стабилизаторов на физико-механические и электрофизические свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе эпоксидного связующего ЭД-20, модифицированного одностенными углеродными нанотрубками, а также выявление роли стабилизаторов в замедлении деградации полимерной матрицы для сохранения во времени прочностных характеристик материала.

Основная часть

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: отработать технологию получения образцов с различными типами стабилизаторов, а также с введением токопроводящего наполнителя – концентрата одностенных углеродных нанотрубок; провести механические испытания образцов на растяжение до и после совместного УФ- и термовоздействия для оценки изменения прочности и модуля упругости; измерить электросопротивление образцов с углеродными нанотрубками в процессе деградации и оценить динамику его изменения как индикатора структурной целостности перколяционной сети [12]; сопоставить эффективность различных стабилизаторов и их комбинаций с точки зрения сохранения физико-механических и электрофизических характеристик [13], а также обосновать оптимальную рецептуру для обеспечения баланса между стабильностью свойств во времени и требуемыми



электрофизическими параметрами. Было изготовлено два типа образцов для проведения эксперимента по деградации в два этапа:

- исследование влияния стабилизаторов на прочностные свойства полимерной матрицы (образцы со стабилизаторами);
- оценка изменения электросопротивления в образцах ПКМ (образцы с электропроводящими структурами и стабилизаторами).

Объектом экспериментальных исследований являлся наномодифицированный полимерный материал. В качестве полимерной матрицы (часть А) для изготовления ПКМ использовали ЭД-20 - эпоксидно-диановая смола (ООО «РУСЭКОХИМ», Россия). Она применяется в промышленности в чистом виде, или в качестве компонентов композиционных материалов - заливочных и пропиточных компаундов, клеев, герметиков, связующих для армированных пластиков, защитных покрытий [14]. В качестве отвердителя (часть В) использовали Этал-45 (АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ»; Россия) в соотношении смолы к отвердителю 2:1. Это нетоксичный отвердитель аминного типа для эпоксидных смол и компаундов на их основе.

Современные полимерные композиции нуждаются в многоступенчатой системе стабилизации. Для защиты от светового старения применяют УФ-стабилизаторы [15], такие как UV-783 (HALS 783, UV Light Stabilizer 783, Tinuvin 783) - это УФ-стабилизатор для полимеров (таблица 1), в виде гранул белого цвета. Он применяется при создании устойчивых к УФ-воздействию долговечных ПКМ на основе полимеров. В свою очередь, для защиты от высоких температур и окисления в состав вводят термостабилизаторы, такие как Диафен ФП или Неозон Д. Первый - в виде гранул коричнево-серого цвета, легко растворим в бензоле, четыреххлористом углероде, но нерастворим в воде. Неозон Д - представляет собой кристаллический порошок коричневого цвета, повышает стойкость материалов к разрушению при многократных деформациях (усталостную выносливость) и обеспечивает защиту от светоозонного воздействия.

Процесс введения стабилизаторов в компонент А эпоксидной смолы осуществляли при помощи механического диспергатора IKA T18 ULTRA TURRAX на скорости 3000 об/мин в течение 5 мин при комнатной температуре. Стабилизаторы предварительно измельчали при помощи ступки и пестика до порошка.

Таблица 1. Технические характеристики стабилизаторов

Наименование	UV-783	Диафен ФП
	Значение	
Молекулярный вес, а.е.м.	708.34	226
Плотность, кг/м ³	514	1180
Температура плавления, °С, в пределах	50-130	75
Температура воспламенения, °С	Более 200	238

Для обеспечения электропроводности эпоксидных смол с сохранением механических свойств и минимальным воздействием на полимерную матрицу в часть А вводили концентрат углеродных нанотрубок (TUBALL MATRIX 301) с содержанием



одностенных углеродных нанотрубок в количестве 10% (ООО «НПК OCSiAl», Россия) комбинированным способом диспергирования (механический и ультразвуковой) [16]. Эффективность использования дополнительно ультразвука связано с тем, что ультразвуковые волны создают колебания и сдвиги в жидкой среде, а это способствует диспергированию нанотрубок. Перемешивание концентрата нанотрубок происходило в компоненте А эпоксидной смолы с помощью механического диспергатора на скорости 3000 об/мин в течение 5 мин. Затем проводилось перемешивание ультразвуковым гомогенизатором И100-6/840 в течение 5 мин при мощности 50%. Комбинацию двух способов диспергирования нанотрубок в связующем проводили три раза.

Полученные полимерные смеси дегазировали под вакуумом для удаления пузырьков, затем добавляли компонент В (отвердитель) и перемешивали механическим диспергатором в течение 5 мин при 3000 об/мин. Полученную полимерную смесь выливали на фторопластовую оснастку, где предварительно на концах рабочей части образцов лопатки устанавливались контакты в виде медной сетки для обеспечения стабильного сигнала при определении электросопротивления образцов ПКМ. Позже оснастку зажимали второй пластиной сверху и проводили процесс полимеризации в сушильном шкафу (ШС-080-01) при температуре 50 °С в течение 6 ч.

Образцы для испытания изготавливали в форме лопатки (тип 1В) согласно ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) – межгосударственный стандарт «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» [17].

Для проведения испытаний было создано несколько групп образцов в зависимости от соотношений и выбора стабилизаторов. Составы полимерных композиций первого этапа (без электропроводящего наполнителя) приведены в таблице 2.

Таблица 2. Составы образцов полимерных композиций для испытаний

Наименование образца	Количество связующего, %	Количество стабилизатора, %		
		Диафен ФП	Неозон Д	UV-783
Состав 1	100.0	-	-	-
Состав 2	99.0	1	-	-
Состав 3	99.0	-	1	-
Состав 4	98.5	-	-	1,5
Состав 5	97.5	1	-	1,5

Старение образцов осуществляли на специальном стенде (рисунок 1а), разработанном в СибГУ им. М.Ф. Решетнева с моделированием условий УФ- и термовоздействия. Стенд имеет УФ-лампу мощностью 15 Вт и с выходом по ультрафиолету от 33 до 40%, а также нагревательный элемент для обеспечения необходимой температуры внутри установки. Интенсивность УФ-излучения на поверхность образцов составила 1941.17 Вт/м² [18]. Стенд позволяет воспроизвести совокупное воздействие УФ-излучения и тепла на образцы в течение продолжительного времени. Температура в стенде на протяжении эксперимента поддерживалась 40 °С.

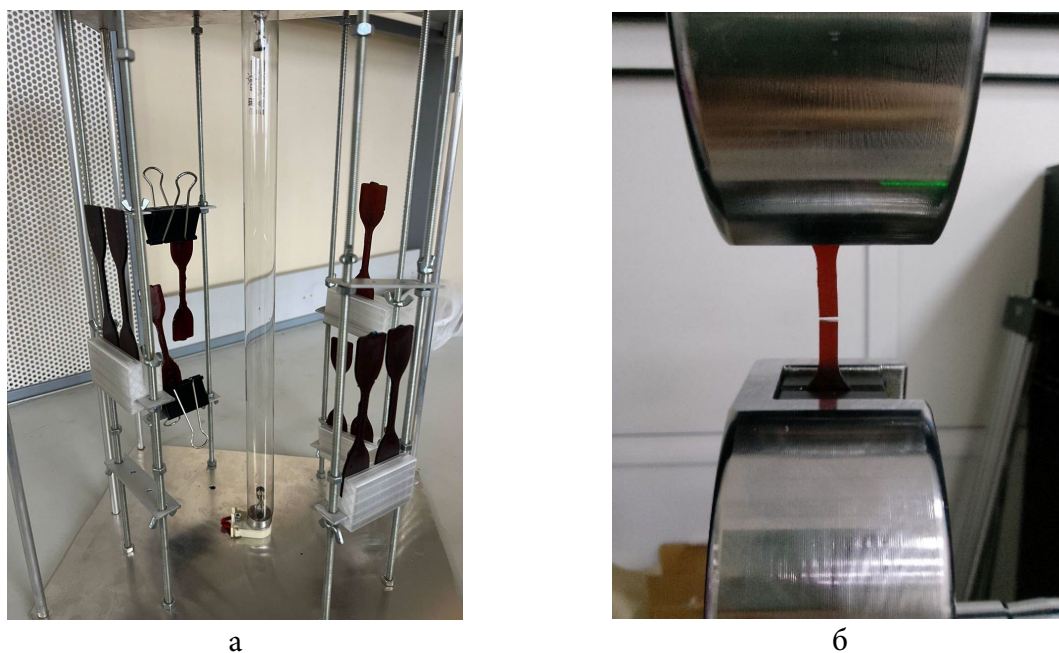


Рис. 1. Образцы в стенде для деградации (а) и на разрывной машине (б)

Для оценки долговременной стабильности свойств полимерных композиций проведены испытания на ускоренное старение при экспозиции 168, 336 и 504 ч. Выбор верхней границы температуры (40 °С) обусловлен тем, что её превышение (ближе к температуре стеклования полимерной матрицы, выше 50 °С) могло бы привести к потере геометрической стабильности образцов.

Согласно литературным данным [18], годовая доза УФ-излучения в регионах с высоким уровнем солнечной радиации составляет в среднем $2.5 \cdot 10^8$ Дж/м². Если подставить в расчёт измеренную на поверхности образцов интенсивность УФ-облучения, то время, необходимое для накопления эквивалентной годовой дозы в лабораторных условиях, составит:

$$t_e = \frac{W}{I} = \frac{2,5 \cdot 10^8}{1941,17} = 1,29 \cdot 10^5 \approx 35,8 \text{ ч.}$$

где t_e – время достижения дозы УФ-излучения, с; W – доза УФ-излучения за время t , Дж/м²; I – интенсивность УФ-излучения, Вт/м².

Таким образом, для достижения годовой дозы УФ-облучения, характерной для тёплого климата, достаточно 35.8 ч непрерывной работы установки. Согласно подходу, описанному в работах [18-19], коэффициент ускорения k определяется как отношение времени естественного старения к времени ускоренного старения при одинаковой накопленной дозе:

$$k = \frac{t_{\text{ест}}}{t_e} = \frac{3,154 \cdot 10^7}{1,29 \cdot 10^5} \approx 244,5$$

Таким образом, 1 ч испытаний в УФ-камере эквивалентен примерно 244.5 ч естественного облучения при среднегодовой интенсивности. Соответственно, продолжительность ускоренных испытаний (168, 336 и 504 ч) позволяет смоделировать различные сроки эксплуатации материалов.



Испытание образцов на растяжение проводилось согласно ГОСТ 32656-2017 «Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение» [20]. Для проведения испытаний было создано несколько групп образцов ПКМ с разным составом.

Образцы испытывали на электромеханической испытательной машине ГОСТ серия МИМ (Россия) с максимальной грузоподъемностью 10 кН. Образцы закрепляли в захватах и подвергали одноосному растяжению до разрушения в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012).

Экспериментальная часть

Полученные в ходе испытаний значения прочности при растяжении для всех пяти исследуемых составов полимерных композиций (таблица 2): контрольного (состав 1 - без стабилизаторов), содержащий антиоксидант Неозон Д (состав 3), фенольный антиоксидант Диафен ФП (состав 2), светостабилизатор UV-783 (состав 4) и их комбинацию (состав 5) - как исходных, так и после 504 ч совместного УФ- и термовоздействия - приведены на рисунке 2. В частности, на гистограмме сопоставлены результаты для исходных образцов (без стабилизаторов), а также для композиций, содержащих фенольный антиоксидант Диафен ФП, светостабилизатор UV-783 и их бинарную комбинацию, как в состоянии после формования, так и после 504 ч совместного воздействия УФ-излучения и повышенной температуры. Это позволяет наглядно сравнить влияние каждого из введенных стабилизаторов на сохранение механических свойств полимерной матрицы в условиях ускоренного старения.

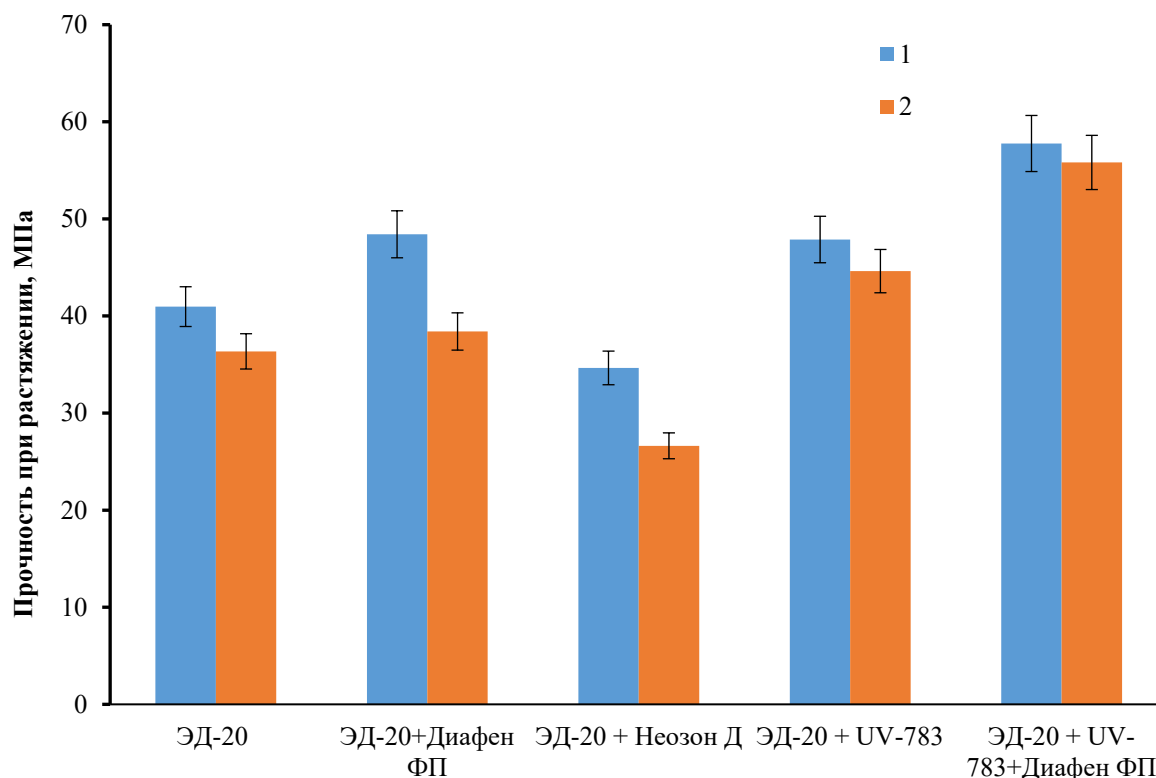


Рис. 2. - Влияние стабилизаторов на прочность образцов полимерных композиций при растяжении до (1) и после УФ- и термодеградаци (2) в течение 504 ч



Анализ прочности образцов, представленный на рис. 2, показал, что все исследованные добавки влияют на механические свойства полимерной матрицы, однако характер и степень этого влияния различаются. Антиоксидант фенольного типа Диафен ФП умеренно повышает прочностные показатели по сравнению с контрольным образцом, что, вероятно, связано с дополнительным структурированием полимера за счёт образования физических сшивок.

Светостабилизатор UV-783 (олигомерный затруднённый амин, HALS) обеспечивает наиболее выраженный прирост прочности среди всех однофакторных добавок. Высокая эффективность объясняется его термической стабильностью, низкой миграцией и возможным образованием дополнительных физических узлов в сетке полимера.

Особый интерес представляет оценка эффективности комбинированной стабилизации. Полимерная смесь со стабилизаторами UV-783 и Диафеном ФП также даёт высокие значения прироста прочности, сопоставимые с образцом, содержащим только UV-783. Совместное применение УФ-стабилизаторов и антиоксидантов, как правило, направлено на создание многоуровневой системы защиты. В данном случае комбинация UV-783 с антиоксидантом фенольного типа обеспечивает более эффективное подавление деструкции как на поверхности, так и в объёме материала. Таким образом, исходя из результатов механических испытаний, дальнейшие исследования воздействия УФ- и термодеградаций были продолжены на составе ЭД-20 + UV-783 + Диафен ФП, поскольку именно он продемонстрировал максимальную прочность исследуемых образцов и составил около 55 МПа.

На втором этапе в полимерную матрицу выбранных составов вводился электропроводящий наполнитель – концентрат одностенных углеродных нанотрубок (TUBALL MATRIX 301). На основании реологических исследований была выбрана оптимальная концентрация УНТ – 1.0 масс. %, обеспечивающая формирование стабильной перколяционной сети при сохранении технологической вязкости связующего. Модифицированные составы приведены в таблице 3.

Таблица 3. Составы образцов ПКМ для испытаний

Образец материала	Количество связующего, %	Количество УНТ, %	Количество стабилизатора, %	
			Диафен ФП	UV-783
Состав 1 + TUBALL MATRIX 301	99.0	1	-	-
Состав 5 + TUBALL MATRIX 301	96.5	1	1	1.5

Для исследования влияния комбинированного воздействия двух факторов на электропроводящие характеристики образцы ПКМ были разделены на две группы: состав 1 – базовая матрица ЭД-20 с углеродными нанотрубками (без стабилизаторов), состав 5 – дополнительно содержащий 1.5% фотостабилизатора UV-783 и 1% антиоксиданта Диафен ФП. На рисунке 3 представлена динамика изменения прочности при растяжении для этих двух групп в процессе 504 ч совместного УФ- и термовоздействия.



Сравнительный анализ двух серий образцов показал принципиальные различия в кинетике деградации механических свойств при последовательном увеличении экспозиции в УФ-стенде. В качестве контрольной выступала серия без стабилизаторов (ЭД-20 с TUBALL MATRIX 301), в качестве опытной – серия с комбинированной системой защиты (ЭД-20+UV-783 с Диафен ФП и TUBALL MATRIX 301). В исходном состоянии стабилизированный состав 5 превосходит нестабилизированный аналог (состав 1) по прочности на 18.5 % (64 МПа против 54 МПа). Такое улучшение, обусловлено несколькими факторами. Во-первых, олигомерный УФ-стабилизатор UV-783, обладая низкой миграцией, может образовывать дополнительные физические узлы сшивки с эпоксидной матрицей за счёт водородных связей между аминогруппами HALS и гидроксильными группами смолы, что повышает плотность сетки. Во-вторых, комбинация с фенольным антиоксидантом Диафен ФП, способствует более равномерному распределению локальных напряжений на микроуровне, уменьшая концентрацию дефектов, неизбежно возникающих при введении наполнителя. В результате полимерная матрица становится более однородной, что и даёт прирост прочности ещё до начала ускоренного старения.

После 168 ч старения у состава 1 + TUBALL MATRIX 301 прочность падает до 48 МПа, тогда как стабилизированный состав 5 сохраняет 62.5 МПа (падение на 2.3%). Следовательно, на начальном этапе комбинация Диафен ФП + UV-783 эффективно замедляет деструкцию полимерной матрицы.

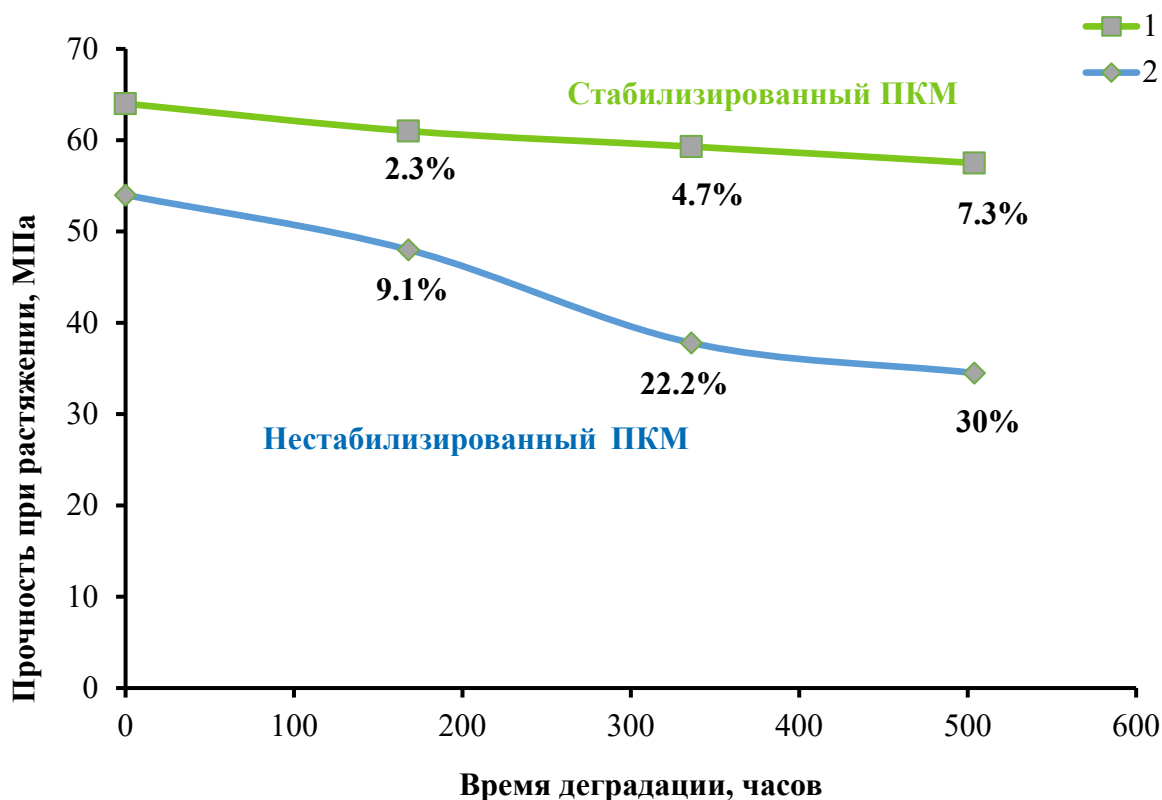


Рис. 3. Влияние стабилизаторов на прочность при растяжении электропроводящих образцов ПКМ на основе эпоксидного связующего ЭД-20 с 1.0 масс. % TUBALL MATRIX 301 в процессе совместного УФ- и термодействия в течение 504 ч: 1 – образцы с комбинированной системой стабилизаторов (UV-783 1.5% + Диафен ФП 1%); 2 – нестабилизированные образцы



При увеличении экспозиции до 336 ч для нестабилизированного образца прочность снижается до 42 МПа (общее падение составило 22.2 %). У стабилизированного состава эти показатели составляют 61 МПа (-4.7%). При этом дополнительное падение прочности в интервале 336-504 ч у нестабилизированного материала достигает 17.8%, тогда как у стабилизированного – лишь 5.5%, что свидетельствует о сохранении защитной эффективности при длительных экспозициях и предотвращении деградации межфазных контактов.

Аналогичная тенденция наблюдается и для модуля упругости. Исходный модуль состава 5 с TUBALL MATRIX 301 (3450 МПа) превышает показатель состава 1 с TUBALL MATRIX 301 (3250 МПа) на 6.2%. После 336 ч старения модуль состава 1 снижается до 2900 МПа (падение на 10.8%), а состава 5 – до 3200 МПа (падение на 7.2%). К 504 ч модуль состава 1 падает до 2600 МПа (общее падение 20%), а состава 5 – до 3050 МПа (общее падение 11.6%). Таким образом, стабилизация эффективно замедляет деградацию как прочностных, так и упругих свойств электропроводящего нанокompозита.

Для изменения электрического сопротивления образцов при деформации использовался цифровой мультиметр UT61E с функцией NCV (Россия). Мультиметр подключался к образцам с помощью зажимов к медным контактам, интегрированным в образцы ПКМ при формовании. Измерение сопротивления проводилось до начала испытаний и далее еженедельно в течение трех недель (504 ч) нахождения образцов в УФ-стенде, совмещающем воздействие УФ-излучения и температуры.

На рис. 4 представлена динамика изменения электросопротивления для двух групп образцов ПКМ на основе эпоксидного связующего ЭД-20, модифицированного 1.0 масс. % одностенных углеродных нанотрубок: без стабилизаторов (ЭД-20 + TUBALL MATRIX 301) и с комбинированной системой стабилизаторов (ЭД-20 + UV-783 + Диафен ФП + TUBALL MATRIX 301) в процессе 504 ч совместного УФ- и термовоздействия.

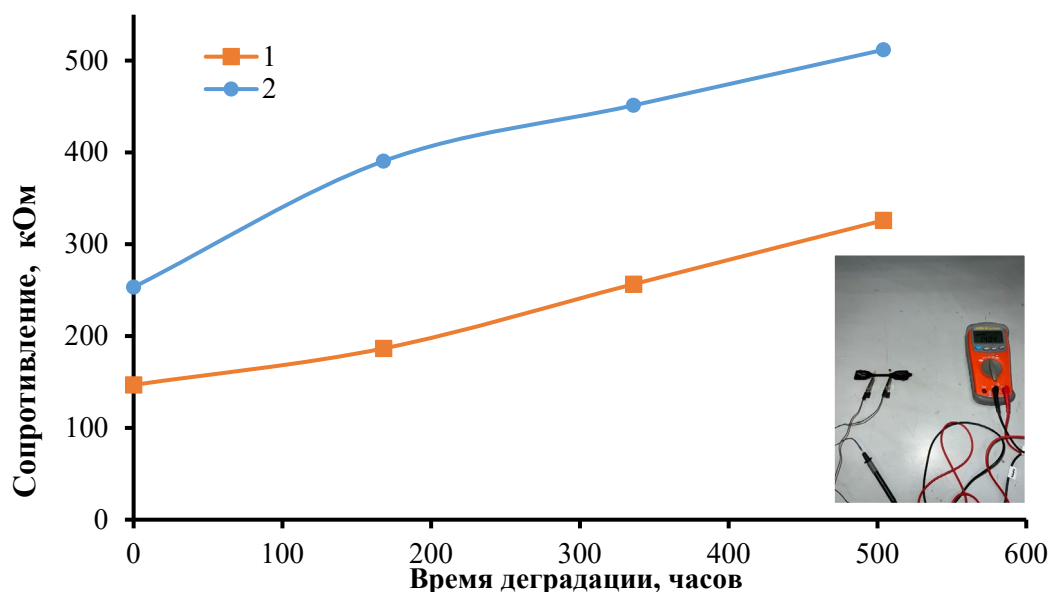


Рис. 4. Изменение электросопротивления образцов ПКМ на основе эпоксидного связующего ЭД-20 с 1.0 масс. % TUBALL MATRIX 301 в процессе совместного УФ- и термовоздействия: 1 – образцы с комбинированной системой стабилизаторов (UV-783 1.5% + Диафен ФП 1%, состав 5, таблица 3); 2 – образцы без стабилизаторов



К концу наблюдений (504 ч) их электросопротивление достигает значений, значительно превышающих показатели стабилизированных композитов. Образцы без стабилизаторов демонстрируют резкое увеличение сопротивления уже на начальных этапах деградации. Уже на первой неделе (168 ч) фиксируется увеличение сопротивления в 1.5 раза относительно исходного уровня.

Установлено, что после 504 ч экспозиции сопротивление нестабилизированных образцов (ЭД-20 + TUBALL MATRIX 301) возрастает с 253 до 510 кОм. Вероятно, это связано с массовым разрывом перколяционных контактов между нанотрубками вследствие деструкции полимерной матрицы: возникают микротрещины, происходит окисление поверхностных слоёв и разрывы полимерных цепей. В противоположность этому, введение комбинированной системы стабилизаторов (UV-783 с Диафеном ФП) приводит к существенно более медленному росту сопротивления: за те же 504 ч увеличение составляет чуть более чем в два раза от исходного – с 145 до 325 кОм (Состав 5 + TUBALL MATRIX 301).

Такое различие объясняется механизмом действия стабилизаторов. UV-783, который эффективно гасит свободные радикалы, образующиеся под действием УФ, предотвращая фотоокисление поверхности и приповерхностных слоёв; благодаря олигомерной структуре он мало мигрирует и обеспечивает долговременную защиту. Диафен ФП подавляет термоокислительную деградацию в объёме матрицы при нагреве. В результате полимерная матрица сохраняет целостность, уменьшается количество микротрещин и разрывов цепей, а проводящая сеть из углеродных нанотрубок остаётся практически неизменной. Таким образом, введение стабилизаторов снижает скорость роста сопротивления по сравнению с нестабилизированными образцами через 504 часа совместного термо- и УФ-воздействия на образцы ПКМ.

Выводы

В результате проведенного исследования установлено влияние стабилизаторов (UV-783, Диафена ФП) на физико-механические и электрофизические свойства полимерных композиционных материалов на основе эпоксидного связующего ЭД-20, модифицированного одностенными углеродными нанотрубками.

Показано, что введение стабилизаторов (UV-783, Диафен ФП) в количестве 1-1.5 масс. % приводит к изменению прочностных характеристик полимерных композиций. Наибольший прирост модуля упругости при растяжении обеспечивает фотостабилизатор UV-783, что, вероятно, связано с формированием дополнительных физических узлов сетки полимера. Комбинированное применение двух стабилизаторов (состав 5) позволяет достичь максимального сохранения механических свойств после 504 ч совместного УФ- и термовоздействия.

Показано, что электросопротивление наномодифицированных ПКМ является высокочувствительным неразрушающим индикатором структурной деградации полимерной матрицы. Исходное сопротивление нестабилизированных образцов составляло 253 кОм, а образцов с комбинированной системой стабилизаторов – 145 кОм. После 504 ч совместного УФ- и термовоздействия у нестабилизированных образцов



сопротивление возросло до 510 кОм, что свидетельствует о разрыве перколяционных контактов между нанотрубками. В то же время для образцов, содержащих стабилизаторы (UV-783 с Диафеном ФП), сопротивление по окончании испытаний не превысило 325 кОм, что соответствует увеличению чуть более чем в два раза относительно исходного уровня.

Установлена корреляция между сохранением механических свойств и стабильностью электросопротивления, что позволяет рекомендовать метод измерения сопротивления для оперативного неразрушающего контроля целостности проводящей сети и прогнозирования долговечности ПКМ на основе эпоксидного связующего при совместном воздействии УФ-излучения и повышенных температур.

Научно-практическая значимость работы состоит в обосновании возможности оптимизации рецептуры ПКМ путём подбора комбинации стабилизаторов, обеспечивающей баланс между стабильностью физико-механических характеристик и требуемыми электрофизическими параметрами. Предложенный подход позволяет существенно продлить срок службы электропроводящих полимерных композитов, сохраняя их функциональность в авиастроении, электротехнике и других отраслях, где критичны длительная стабильность свойств и устойчивость к УФ- и термовоздействию.

Список источников

1. Shi Z., Zou C., Zhou F., Zhao J. Analysis of the Mechanical Properties and Damage Mechanism of Carbon Fiber/Epoxy Composites under UV Aging. *Materials*, 2022, 15(8), 2919. DOI: 10.3390/ma15082919
2. Лаптев А.Б., Нестеров А.С., Варданян А.М., Николаев Е.В. Принципы воздействия тепла, влаги и ультрафиолетового излучения на полимерные материалы и изучение их свойств методом факторного эксперимента. *Труды ВИАМ*, 2021, 8(102), 34-43. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-34-43
3. Петухова Е.С., Федоров А.Л. Климатические испытания полиэтиленовых композиционных материалов, содержащих различные стабилизирующие добавки. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*, 2019, 24(4), 161-168. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-4-16
4. Низин Д.Р., Низина Т.А., Селяев В.П., Канаева Н.С. Обратимые и необратимые изменения свойств полимерных материалов при полномасштабном климатическом старении. *Умные композиты в строительстве*, 2022, 3(1), 18-29. DOI: 10.52957/27821919_2022_1_18
5. Huang J., Kuo C., Choi K., Tsai H. Anti-corrosive and UV-resistant three-dimensional epoxy coating based on reduced graphene oxide, modified carbon nanotubes. *Polym. Degrad. Stab.*, 2024, 110629. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110629
6. Du B., Chen N., Zhang G. Enhanced ultraviolet aging resistance of epoxy resins through surface enrichment achieved by fluorinated graphene oxide@CeO₂. *Compos. Sci. Technol.*, 2024, 110655. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110655
7. Rabnawaz M., Selke S.E.M., Wyman I. Degradation, Stabilization, and Recycling of Packaging Materials. 1st ed. Wiley-Blackwell, 2025, 384 pp. DOI: 10.1002/9781394294299.
8. Huang X., Zhang S., Zhang P. Autonomous indication of electrical degradation in polymers. *Nat. Mater.*, 2023, 22(2), 237-243. DOI: 10.1038/s41563-022-01435-5
9. Zhang Y., Li X., Wang H. Electrical conductivity evolution of carbon nanotube/epoxy composites under combined UV and thermal aging. *Compos. Sci. Technol.*, 2023, 234, 109942. DOI: 10.1016/j.compscitech.2023.109942
10. Kumar A., Singh B.P., Choudhary V. Synergistic effect of UV stabilizer and antioxidant on the degradation kinetics of epoxy nanocomposites. *Polym. Degrad. Stab.*, 2022, 198, 109875. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.109875



11. **Chen X., Wang J., Liu Y.** Efficiency of UV-783 and Diafen FP in delaying the resistivity increase of conductive polymer composites under hydrothermal aging. *Prog. Org. Coat.*, 2024, 189, 108267. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108267
12. **Tian C., Wang Y., Yang Q., Ge Z., Du. Y.** Smart properties of carbon nanotube-epoxy composites. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part L*. 2020, 234(11) 1409-1416. DOI: 10.1177/1464420720942934.
13. **Liao L.M., Pan C.X.** Enhanced Electrochemical Capacitance of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes Synthesized from Amine Flames. *Soft Nanoscience Letters.*, 2011, 1(1), 16–23. DOI: 10.4236/snsl.2011.11004
14. **Корсаков А.В., Недорубов А.С., Пашков А.И., Шалыгина Т.А., Ворончихин В.Д., Власов В.В.** Исследование модификации эпоксидной смолы малеиновым ангидридом и возможность ее применения в составе защитных покрытий. *От химии к технологии шаг за шагом*, 2024, 5(4), 51-57. DOI: 10.52957/2782-1900-2024-5-4-51-57
15. **Sun X., Zhu Y., Mao J.** UV aging behavior evolution characterization of HALS-modified asphalt based on micro-morphological features. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 2023, 62(1), 20230306. DOI: 10.1515/rams-2023-0306
16. **Семенуха О.В., Воронина С.Ю., Фесик С.А.** Исследование влияния гибридного наполнителя на тензочувствительность нанокomпозиционного материала. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 2024, 25(2), 256–263. DOI: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-256-263.
17. **ГОСТ 11262— 2017 (ISO 527-2:2012).** Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М. Стандартиформ 2018, 25 с.
18. **Eremin N.V., Voronina S.Y., Shalygina T.A., Vlasov V.V., Sukhanova A.A.** Impact of artificial aging on the physical and mechanical properties of polycaprolactone under the combined effect of UV-radiation and elevated temperatures. *Polym.-Plast. Technol. Mater.*, 2025, 64(8), 1235-1251. DOI: 10.1080/25740881.2025.2456941
19. **Eremin N.V., Voronina S.Y., Shalygina T.A., Vlasov V.V., Fesik S.A., Sukhanova A.A.** Effect of artificial UV-thermal ageing on the structural and mechanical properties of PLA and PBAT. *Express Polym. Lett.*, 2026, 20(2), 168-185. DOI 10.3144/expresspolymlett.2026.14.
20. **ГОСТ 32656-2017 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009)** Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение. М. Стандартиформ, 2017, 31 с.

Поступила в редакцию 02.06.2026

Одобрена после рецензирования 27.07.2026

Принята к опубликованию 19.08.2026