

УДК 620.17:621.785.784:691.175  
EDN OCMVMF (<https://elibrary.ru/ocmvmf>)  
DOI 10.33113/mkmk.ras.2024.30.02.03



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСКОРЕННОЙ ДЕГРАДАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Еремин Н.В.<sup>1</sup>, Москвичев Е.В.<sup>2</sup>, Антишин Д.В.<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия*

*<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных  
технологий, г. Красноярск, Россия*

### АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты экспериментов по изучению влияния длительного УФ-излучения и температуры на механические характеристики композиционного материала. Исследованный материал состоял из однонаправленных углеродных волокон IMS65 и высокотемпературной эпоксидной смолы T26. Согласно представленной экспериментальной программе, была проведена ускоренная деградация образцов композиционного материала под воздействием повышенной температуры +100°C и УФ-излучения в течение 360, 720 и 1080 часов. Деградация проводилась на специально разработанном испытательном стенде, который включал в себя термокамеру и УФ-лампу. Данный стенд обеспечивал контролируемую стабильную среду, которая позволила имитировать комбинированное воздействие теплового и УФ-излучения на материал в течение длительного времени. Всего на стенде было подготовлено 60 плоских образцов со схемами армирования [0]<sub>s</sub>, [±45]<sub>s</sub>, [90]<sub>s</sub> и с различным временем деградации. Данные образцы испытывались на растяжение до разрушения, в результате чего были определены модуль упругости и предел прочности исследованного материала. По данным испытаний были построены кривые зависимости модуля упругости и предела прочности в зависимости от времени деградации материала для разных схем армирования. Анализ полученных результатов показал, что от воздействия УФ-излучения и повышенной температуры модуль упругости и предел прочности материала снизились на 10-20%. При этом было отмечено, что для образцов со схемами армирования [±45]<sub>s</sub>, [90]<sub>s</sub> эффект деградации влияет на механические характеристики значительно сильнее. Это обуславливает необходимость учета рассмотренных факторов деградации при проведении расчетов конструкций из композиционных материалов, эксплуатируемых в неблагоприятных условиях окружающей среды.

**Ключевые слова:** композиционный материал; деградация; старение материала; УФ-излучение; модуль упругости; предел прочности

## EXPERIMENTAL STUDIES OF ACCELERATED DEGRADATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF A COMPOSITE MATERIAL UNDER INFLUENCE OF UV RADIATION

Eremin N.V.<sup>1</sup>, Moskvichev E.V.<sup>2</sup>, Antishin D.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>2</sup>*Federal Research Center for Information and Computational Technologies,  
Krasnoyarsk, Russia*

## ABSTRACT

In this work the effect of long-time UV-radiation and temperature degradation on mechanical properties of composite material was experimentally studied. The composite material consisted of carbon fibers IMS65 and high-temperature epoxy resin T26. In accordance with experimental program the accelerated degradation was performed on composite material under +100°C temperature and UV-radiation during 360, 720 and 1080 hours. The degradation process was carried out on the special test bench which had a thermal chamber and an UV lamp. This test bench provided controlled and stable environment for imitating combined thermal and UV effect for a long-time period. The 60 specimens were aged on the test bench with [0]<sub>8</sub>, [±45]<sub>8</sub>, [90]<sub>8</sub> layout and different degradation time. These specimens were tested on tension till break to determine the Young's modulus and the strength of the aged composite material. Processing the test data the dependences of mechanical properties on degradation time were estimated for each material layout. The results showed that UV-radiation and temperature effect reduced the Young's modulus and the tensile strength on 10-20%. It was mentioned that for specimens with [±45]<sub>8</sub> and [90]<sub>8</sub> layout the degradation effect is much stronger. Thus, the effects of material aging and mechanical properties degradation are needed to be taken into account during analysis of composite structures which operate in unfavorable environmental conditions.

**Keywords:** composite material; degradation; material ageing; UV radiation; modulus of elasticity; tensile strength

## ВВЕДЕНИЕ

Возможность создания конструкций минимального веса с высокими физико-механическими свойствами из композиционных материалов (КМ) обуславливает их широкое применение при изготовлении различных элементов машиностроительной, авиационной и космической техники [1,2]. Проектирование и изготовление ответственных конструкций требует достоверного определения физико-механических свойств и особенностей поведения материалов в условиях эксплуатации. Однако использование КМ в неблагоприятных условиях окружающей среды приводит к деградации механических свойств и старению материала, что ухудшает эксплуатационные характеристики и сокращает срок службы конструкций [3]. Например, полимерные КМ наиболее чувствительны к изменению структурной целостности под воздействием температуры, УФ-излучения, щелочной среды и атмосферы [4]. Совместное воздействие данных факторов приводит к существенному изменению физико-механических свойств [5] и сложно-прогнозируемому механическому поведению под воздействием внешних нагрузок.

Деградация КМ связана с процессами термического окисления, фотоокислительного старения и механизмом свободнорадикальной реакции. Свободнорадикальные процессы развиваются при эксплуатации КМ как в естественных атмосферных условиях, так и в космосе. В атмосфере под воздействием УФ-излучения функциональные группы на поверхности КМ соединяются с молекулами воды и кислорода с образованием продуктов окисления. По мере старения КМ может происходить сшивание, разветвление

и расщепление основной молекулярной цепи полимерной матрицы. Данные реакции приводят к ослаблению связи между волокном и связующим, что непосредственно влияет на механические свойства материала. Перечисленные процессы особенно быстро протекают при повышенных температурах.

В работе [6] было установлено, что УФ-излучение при воздействии в 500 часов приводит к изменениям структуры, в частности, волокна отделяются и вытягиваются вследствие деградации матрицы, что приводит к дефектам на границе их раздела. Данное заключение подтверждается и другими исследователями [7,8]. Кроме того, авторы работы [9] непосредственно установили, что предел прочности и модуль упругости КМ уменьшаются при длительном воздействии УФ-излучения.

Исследователями в работе [10] проведены эксперименты КМ ИМ7/997 с различной схемой армирования под воздействием УФ-излучения интенсивностью излучения  $0,68 \text{ Вт/м}^2$  при длине волны 340 нм и температуре  $60^\circ\text{C}$  в течение 500 часов. После деградации образцы показали снижение веса на 0,27%, что связано с потерей летучих веществ и остаточной влаги. На основе микрографических наблюдений было установлено, что УФ-излучение и конденсация действуют совместно, что приводит к обширной эрозии матрицы, возникновению микротрещин, а также отслоению волокон. Прочность деградируемых КМ на основе углеродных волокон при изгибе и межслойной сдвиге оценивалась по результатам испытаний на трехточечный изгиб [11]. Было определено, что прочность КМ снизилась на 25% при воздействии постоянной повышенной температуры (75% от температуры стеклования) в течение 2160 ч.

Многофакторное воздействие затруднительно в описании, поскольку некоторые факторы деградации КМ достаточно сложно воспроизвести экспериментально. Тем не менее, в данной работе сделана попытка приблизиться к пониманию их совместного эффекта для чего была составлена соответствующая программа исследования деградации механических свойств КМ с различной схемой армирования под воздействием повышенных температур и УФ-излучения. Согласно программе, образцы КМ подвергались ускоренной деградации в течение длительного времени, после чего их механические свойства оценивались по результатам испытания на одноосное растяжение.

## 1. ПОДГОТОВКА И ДЕГРАДАЦИЯ ОБРАЗЦОВ

Образцы слоистого КМ изготавливались методом прессования из однонаправленных композиционных лент на основе углеродных волокон IMS65 (диаметром 5 мкм) и высокотемпературной эпоксидной смолы T26 [12]. Физико-механические свойства структурных элементов КМ представлены в таблице 1. Были изготовлены плоские образцы 3 типов со следующими схемами армирования:  $[0]_8$ ,  $[\pm 45]_8$ ,  $[90]_8$ . Средние размеры образцов: толщина – 0,33 мм, ширина – 20 мм, длина – 150 мм. Всего было изготовлено 60 образцов для исследования при различном времени деградации.

В настоящий момент существует множество методов исследований деградации КМ [7,11,13,14] которые могут применяться как в реальных условиях эксплуатации материала (естественная деградация), так и в условиях ускоренной искусственной деградации. Методы ускоренной искусственной деградации дают более быстрые результаты, чем испытания на естественную деградацию, однако,

как было отмечено ранее, во многих случаях сложно провести испытания с учетом всех воздействующих факторов на материал.

Таблица 1.

Физико-механические свойства структурных элементов однонаправленного КМ.

Характеристика	Углеродное волокно IMS65	Высокотемпературная эпоксидная смола Т-26
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,78	1,17
Модуль упругости, ГПа	290	3,1
Коэффициент Пуассона	0,28	0,3
Предел прочности при растяжении, МПа	5800	98
Температура стеклования, °С	–	202

В связи с этим, деградация механических свойств КМ проводилась на специально разработанном испытательном стенде, который включает в себя термокамеру и УФ-лампу мощностью 15 Вт и длиной волны 253,7 нм с выходом по ультрафиолету от 33 до 40% (рис.1). Интенсивность УФ-излучения составила примерно 2281,25 Вт/м<sup>2</sup>. Данная камера обеспечивает контролируемую стабильную среду, которая позволяет имитировать комбинированное воздействие теплового и УФ-излучения на материал в течение длительного времени. Образцы размещались на стальной раме на расстоянии 25 мм от УФ-лампы, что эмитировало неблагоприятные условия эксплуатации.

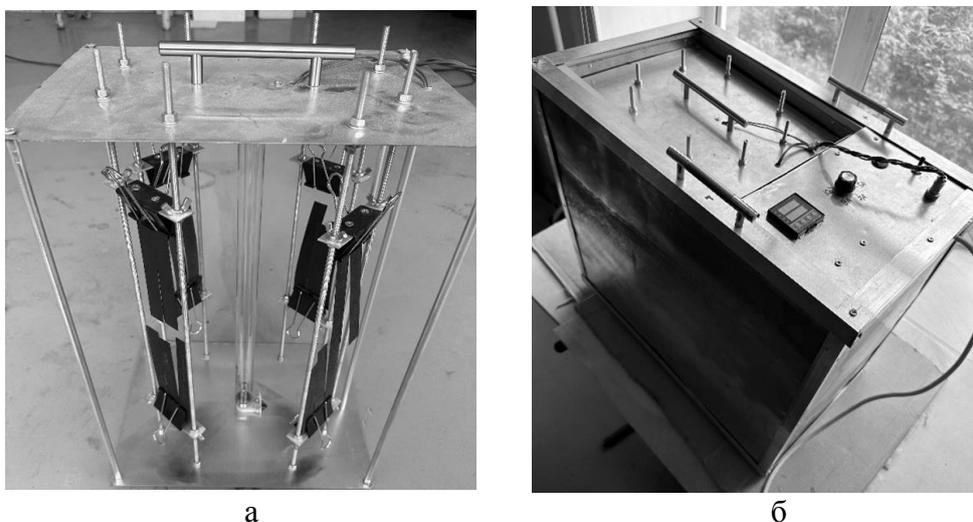


Рис.1. Стенд для деградации полимерных КМ: а) платформа для крепления образцов; б) общий вид.

Зная интенсивность УФ-излучения можно оценить время необходимое  $t_e$ , для достижения УФ-дозы в ходе ускоренных испытаний

$$t_e = \frac{W}{I} = \frac{2,5 \cdot 10^8}{2281,25} = 1,096 \cdot 10^5, \quad (1)$$

где  $t_e$  – время достижения УФ-дозы, с;  $W$  – доза УФ-излучения за время  $t$  (для теплых стран общая доза УФ-излучения на открытом воздухе в течение года составляет  $2,5 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup> [15]), Дж/м<sup>2</sup>;  $I$  – интенсивность УФ-излучения, Вт/м<sup>2</sup>.

Принимая  $t = 3,154 \cdot 10^7$  с (1 год), коэффициент ускорения можно определить как

$$AF = \frac{t}{t_e} = \frac{3,154 \cdot 10^7}{1,096 \cdot 10^5} = 287,76. \quad (2)$$

Деградация образцов КМ проводилась при постоянной повышенной температуре  $+100^\circ\text{C}$  в течение 360, 720, 1080 часов в соответствие с программой испытаний, представленной в таблице 2.

Таблица 2.

Программа испытаний образцов КМ на деградацию механических свойств.

Схема армирования	Время деградации, ч			
	Без деградации	360	720	1080
	Количество образцов			
$[0]_8$	5	5	5	5
$[\pm 45]_8$	5	5	5	5
$[90]_8$	5	5	5	5

После длительной деградации образцов был проведен их осмотр на целостность. На поверхности всех деградированных образцов появился темно-желтый оттенок (рис.2, желтый оттенок представлен в виде белого цвета), что так же наблюдалось в других исследованиях [7,11]. При этом визуально отсутствовали трещины, отслоения, вздутия или другие дефекты.



Рис.2. КМ до деградации (а) и после деградации (б).

После деградации проводилось измерение потери веса образцов. Для этого образцы взвешивались до и после процедуры ускоренной деградации, а относительное изменение веса определялось согласно формуле

$$\omega = \frac{\omega_0 - \omega_d}{\omega_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $\omega_0$  и  $\omega_d$  – вес образца в граммах до и после деградации, соответственно.

Было определено, что потеря веса составила в среднем 0,69% и обусловлена испарением оставшейся влаги после полимеризации КМ.

## 2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ

После деградации на концы образцов приклеивались стеклопластиковые накладки толщиной 2 мм для жесткой фиксации образцов в захватах испытательной машины [16]. Длина рабочей части образцов в среднем составляла 70 мм. Схема армирования  $[0]_8$  соответствовала направлению волокон вдоль образца. Общий вид образцов для проведения испытаний на растяжение представлен на рис.3.

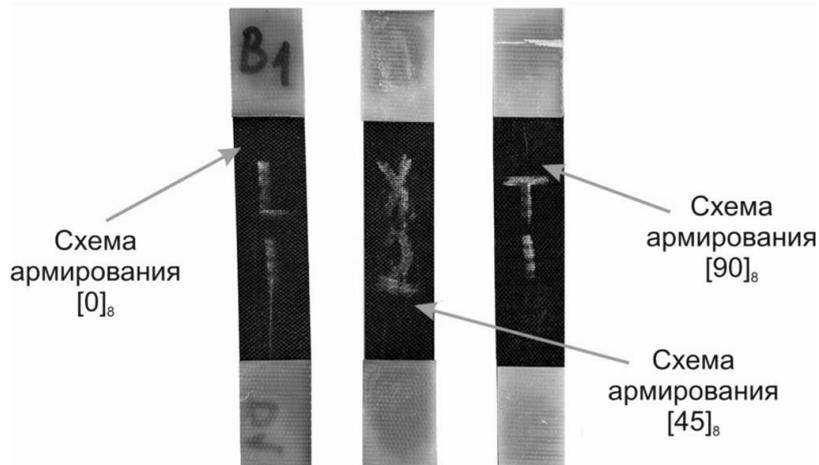


Рис.3. Образцы из композиционного материала с накладками.

Испытания образцов проводились в Инженерно-испытательном центре ФИЦ ИВТ на электромеханической испытательной машине Tinius Olsen 100ST (рис.4) согласно ГОСТ 32656-2017 [17].

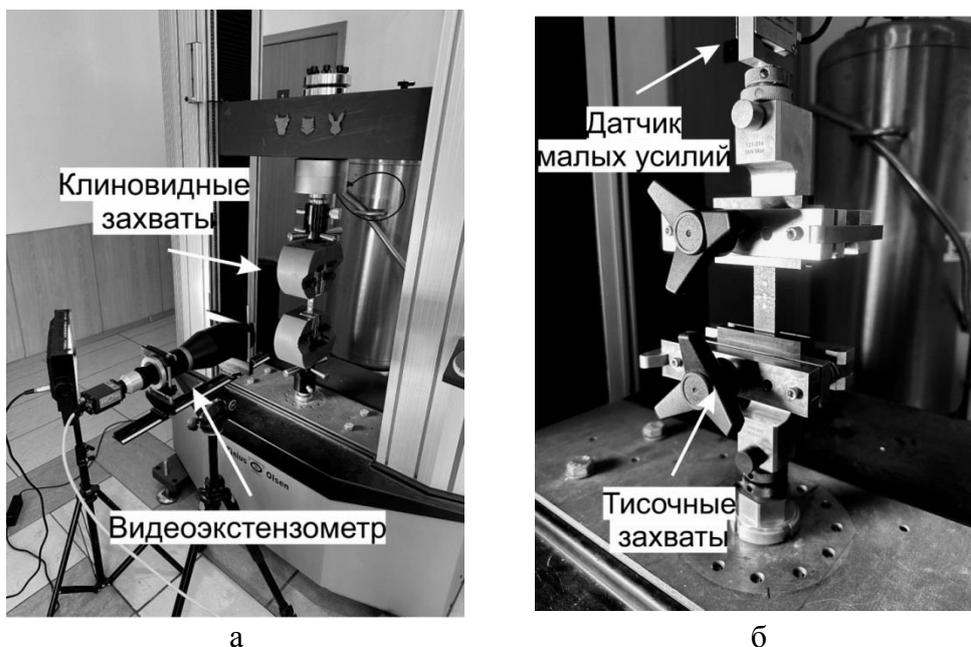


Рис.4. Электромеханическая испытательная машина на растяжение и сжатие Tinius Olsen 100ST: а) общий вид; б) приближенный вид.

Данная испытательная машина обеспечивает растяжение образца с заданной постоянной скоростью перемещения активного захвата и измерение нагрузки с погрешностью не более 1% от измеряемой величины. Испытаний проводились до разрушения.

Перед испытаниями на рабочую часть образцов приклеивались метки, по которым фиксировалась деформация с помощью видеоэкстензомера. Образцы устанавливались в захваты испытательной машины и нагружались со скоростью 2 мм/мин до разрушения. В процессе испытаний проводилась запись диаграмм «нагрузка-перемещение» и «напряжение-деформация» образца в автоматическом режиме с использованием соответствующего программного обеспечения.

Образцы со схемой армирования  $[90]_8$  имели слишком малую жесткость и прочность для установки в массивные клиновидные захваты, поэтому для них использовались тисочные захваты (рис.4б) с датчиком малых усилий, работающем в диапазоне до 250 Н. Скорость нагружения для таких образцов устанавливалась 0,2 мм/мин.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По завершении испытаний были обработаны данные измерений и построены диаграммы нагружения образцов для каждой схемы армирования при различном времени деградации (рис.5-7).

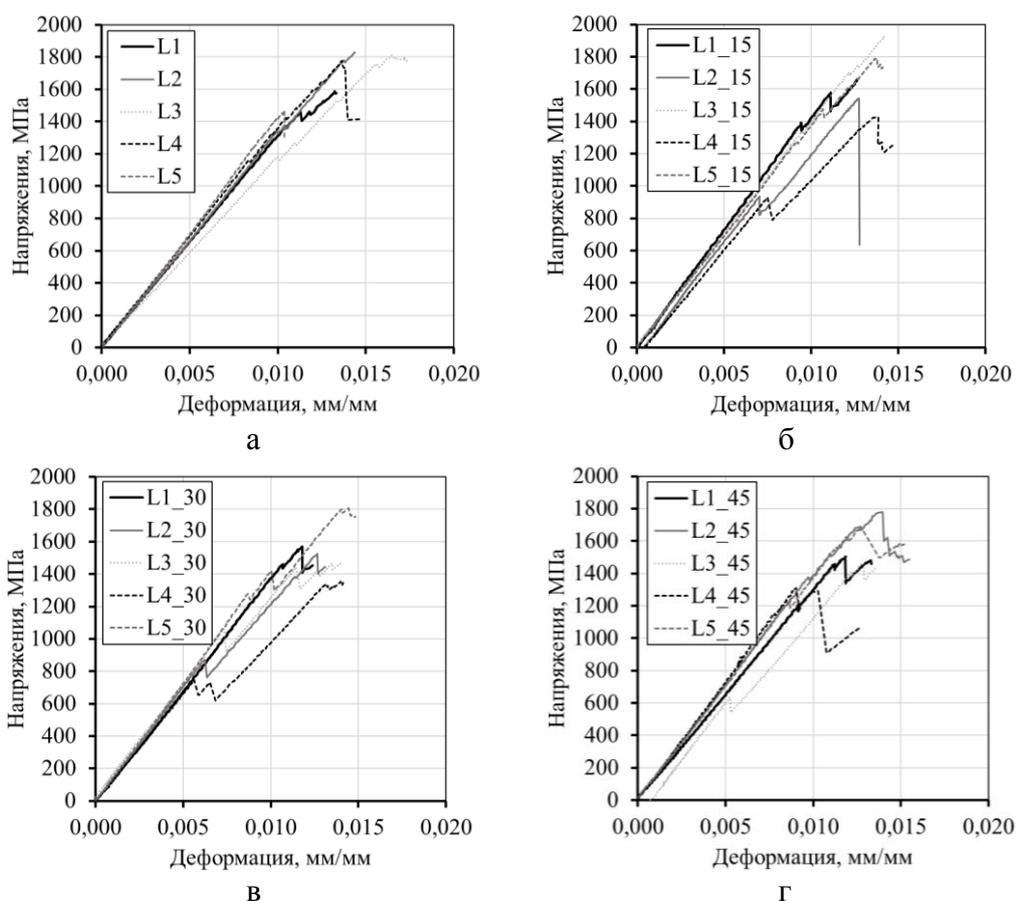
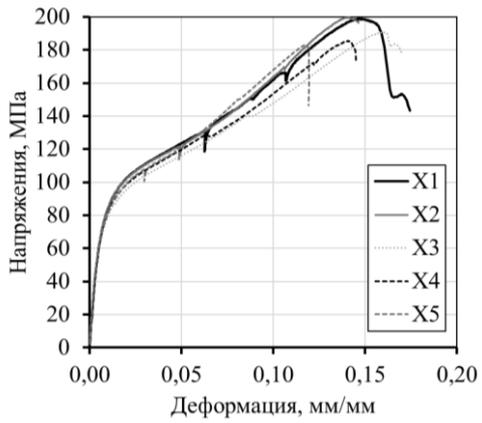
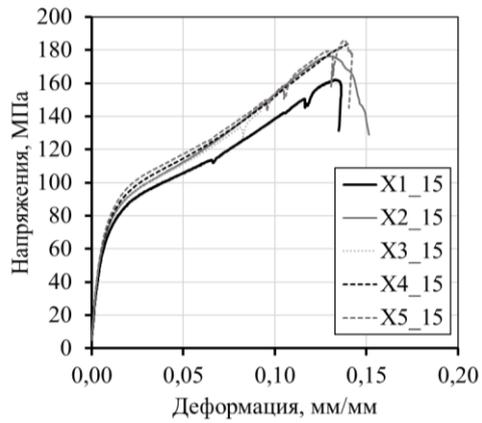


Рис.5. Диаграммы «нагрузка-перемещение» образцов со схемой армирования  $[0]_8$ : а) без деградации; б) 360 часов; в) 720 часов; г) 1080 часов.

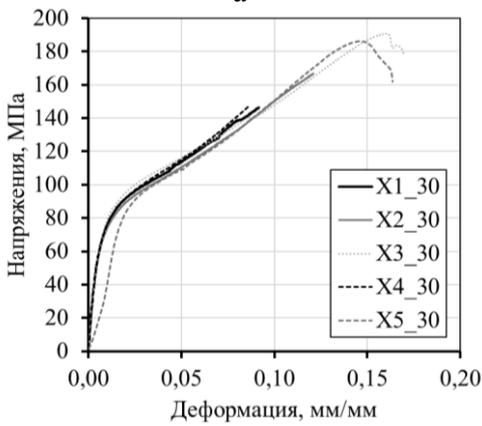
Как следует из диаграмм, деформирование образцов сопровождалось кратковременным снижением нагрузки перед разрушением вследствие разрыва отдельных волокон и передачи нагрузки на неразрушенные волокна. При накоплении большого количества разрушенных волокон образец разрушался полностью.



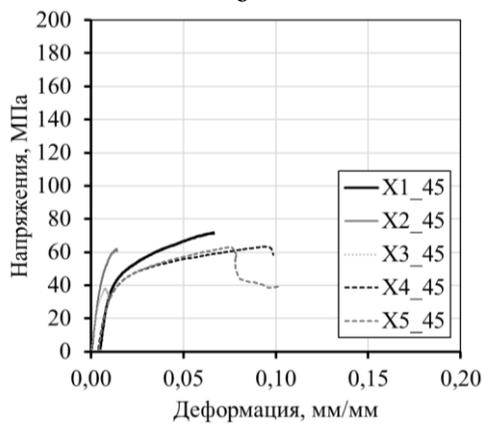
а



б

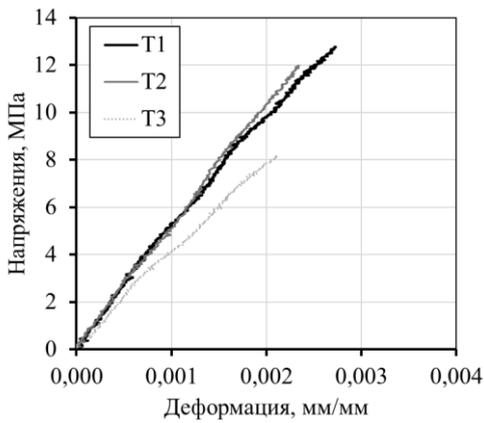


в

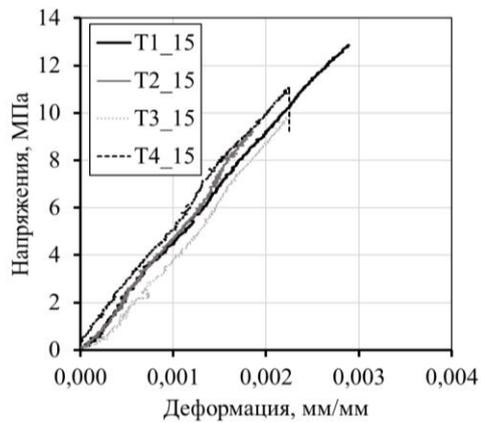


г

Рис.6. Диаграммы «нагрузка-перемещение» КМ со схемой армирования  $[\pm 45]_8$ : а) без деградации; б) 360 часов; в) 720 часов; г) 1080 часов.



а



б

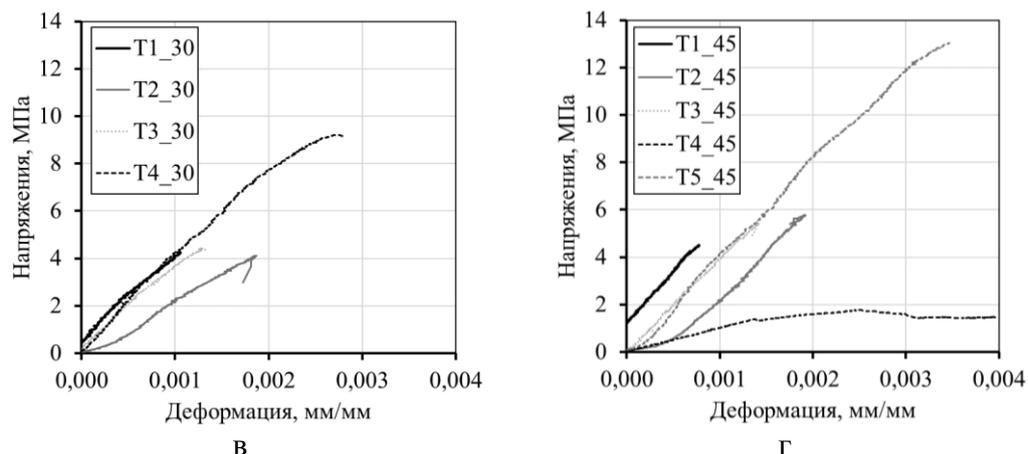


Рис.7. Диаграммы «нагрузка-перемещение» КМ со схемой армирования [90]<sub>8</sub>: а) без деградации механических свойств; б) 360 часов; в) 720 часов; г) 1080 часов.

Характер разрушения образцов с различными схемами армирования представлен на рис.8.

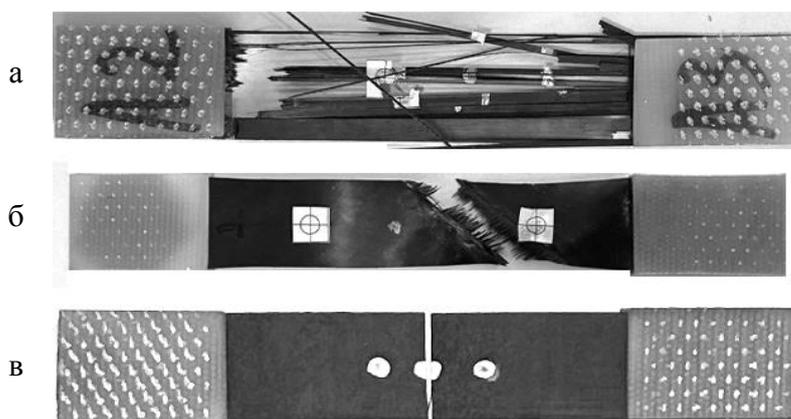


Рис.8. Разрушенные образцы КМ со схемой армирования: а) [0]<sub>8</sub>; б) [±45]<sub>8</sub>; в) [90]<sub>8</sub>.

После определения механических свойств была проведена статистическая обработка полученных экспериментальных данных с определением среднего значения модуля упругости, предела прочности, а также их коэффициентов вариации. Результаты обработки представлены в таблицах 3-5 для КМ с различной схемой армирования в зависимости от времени деградации материала.

Таблица 3.

Средние механические свойства КМ [0]<sub>8</sub>.

Характеристика	Время деградации, ч			
	0	360	720	1080
Модуль упругости, ГПа	142	141	139	138
Коэффициент вариации, %	8,16	5,7	3,77	4,65
Предел прочности, МПа	1693	1671	1544	1535
Коэффициент вариации, %	9,51	12,03	10,84	12,04

Таблица 4.

Средние механические свойства КМ  $[\pm 45]_8$ .

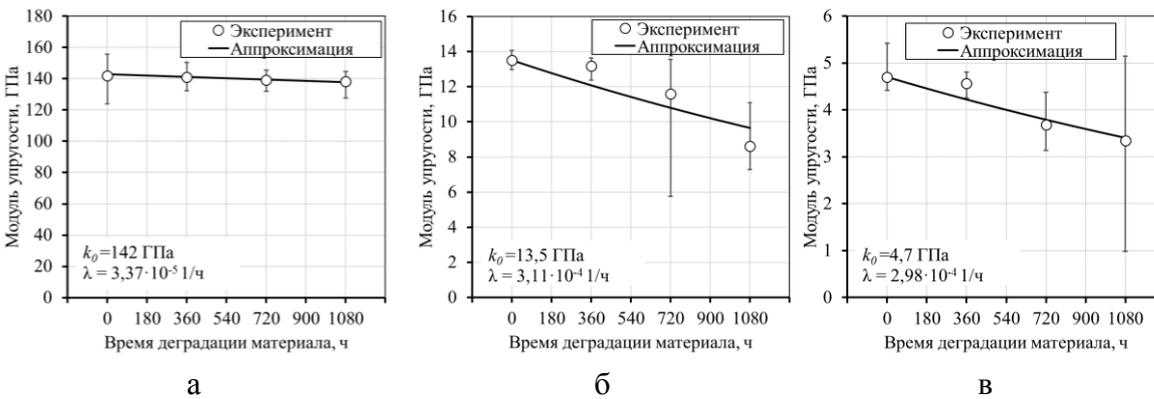
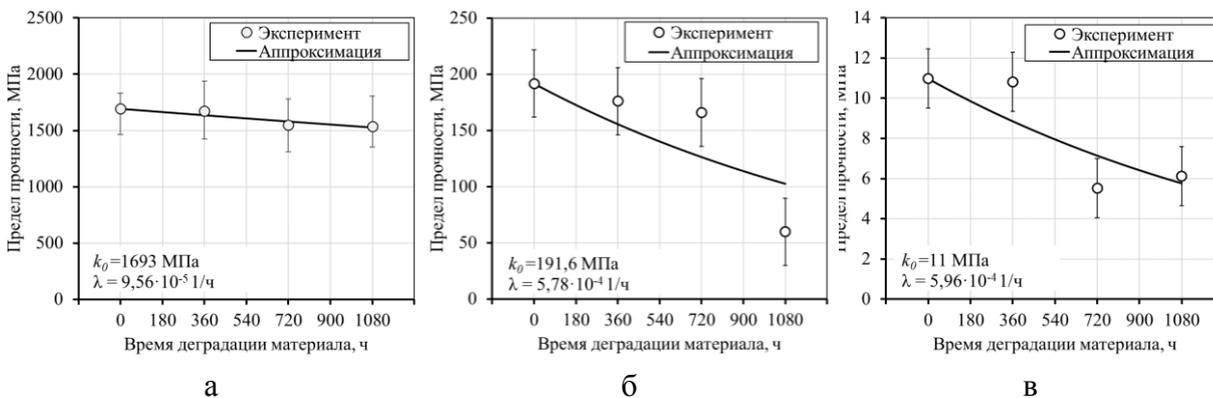
Характеристика	Время деградации, ч			
	0	360	720	1080
Модуль упругости, ГПа	13,5	13,19	11,6	8,6
Коэффициент вариации, %	3,62	3,73	28,29	18,01
Предел прочности, МПа	191,6	175,9	165,8	59,7
Коэффициент вариации, %	3,91	6,11	11,47	21,12

Таблица 5.

Средние механические свойства КМ  $[90]_8$ .

Характеристика	Время деградации, ч			
	0	360	720	1080
Модуль упругости, ГПа	4,7	4,57	3,68	3,34
Коэффициент вариации, %	10,47	5,78	14,6	48,6
Предел прочности, МПа	11	10,8	5,51	6,1
Коэффициент вариации, %	22,48	14,47	44,67	68,44

На рис.9 и 10 представлены графики изменения механических свойств КМ в зависимости от времени деградации. Для образцов со схемой армирования  $[0]_8$  модуль упругости снизился на 2,6%, а предел прочности на 9,3% по сравнению с КМ без деградации.

Рис.9. Кривые модуля упругости КМ в зависимости от времени деградации: а)  $[0]_8$ , б)  $[\pm 45]_8$ , в)  $[90]_8$ .Рис.10. Кривые предела прочности КМ в зависимости от времени деградации: а)  $[0]_8$ , б)  $[\pm 45]_8$ , в)  $[90]_8$ .

Зависимость механических характеристик образцов со схемой [45]<sub>8</sub> по сравнению со схемой [0]<sub>8</sub> значительно отличается. Модуль упругости снизился на 36,3%, а предел прочности на 68,8%. Это объясняется тем, что эпоксидная матрица вносит больший вклад в жесткость и прочность образцов со схемой армирования отличной от [0]<sub>8</sub>. При воздействии УФ-излучения и температуры матрица деградирует, что приводит к её эрозии и образованию микротрещин. Данные дефекты, прежде всего, негативно влияют на связь между волокном и матрицей, а также на процесс передачи нагрузки между волокнами. Важно отметить, что при увеличении времени деградации разброс механических свойств также склонен увеличиваться (таблицы 3 и 4).

Для образцов со схемой армирования [90]<sub>8</sub> модуль упругости снизился на 29%, а предел прочности на 44%. Значительное снижение характерно после 360 часов выдержки (рис.7), когда поверхностный слой матрицы значительно деградировал и материал стал более хрупким.

Для прогнозирования деградации механических свойств в зависимости от времени можно воспользоваться экспоненциальной аппроксимацией экспериментальных данных

$$k(t) = k_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t), \quad (4)$$

где  $k_0$  – механическая характеристика без учета деградации, Па;  $t$  – время, ч;  $\lambda$  – экспериментальная константа, 1/ч.

Для объяснения полученных результатов, можно сделать предположение, что в основном УФ-излучение действует на поверхностный слой КМ, а его распространение вглубь структуры материала затруднительно, даже при длительном воздействии. Поскольку, эпоксидная смола и углеродные волокна имеют разные коэффициенты линейного температурного расширения, то во время выдержки при повышенных температурах деформации в эпоксидной смоле значительно выше, чем в углеродных волокнах [18]. Данный процесс создает термические напряжения на границе раздела «волокно-матрица», что приводит к ослаблению связи и образованию трещин [10]. Следовательно, можно ожидать, что при длительном воздействии окружающей среды УФ-излучение и повышенные температуры совместно вызывают наблюдаемые в эксперименте эффекты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования деградации механических свойств КМ под воздействием УФ-излучения и повышенных температур. В результате были даны оценки изменению механических свойств КМ в зависимости от времени воздействия. Было установлено, что механические свойства значительно снижаются для схем армирования отличных от [0]<sub>8</sub>, а коэффициент вариации механических свойств увеличивается. Таким образом, было установлено, что эксплуатация КМ под воздействием УФ-излучения и повышенных температур приводит к деградации механических свойств материала.

Предлагаемое исследование может быть использовано при разработке методов прогнозирования прочности ответственных конструкций, изготовленных из КМ на основе углеродных волокон и эпоксидного связующего с учетом воздействия неблагоприятных факторов, снижающих эксплуатационные характеристики. Дальнейшие исследования целесообразно посвятить изучению

влияния различных модификаторов эпоксидного связующего на устойчивость КМ к деградации механических свойств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зорин В.А. *Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники // Конструкции из композиционных материалов.* – 2011. – №4. – С.44-59.
2. Москвичев В.В., Тестоедов Н.А. *Несущая способность и безопасность металлокомпозитных баков космических аппаратов.* – Новосибирск: Наука, 2021. – 440 с.
3. Juan Pablo Márquez Costa, Vincent Legrand and Sylvain Fréour. *Durability of Composite Materials under Severe Temperature Conditions: Influence of Moisture Content and Prediction of Thermo-Mechanical Properties During a Fire // Journal of Composites Science.* – 2019. – Vol.3. – No.2. – 55.
4. Shahabaz S.M. et al. *Influence of Temperature on Mechanical Properties and Machining of Fibre Reinforced Polymer Composites: A Review // Engineered Science.* – 2021. – Vol.16. – Pp.26-46.
5. Ратнер С.Б., Ярцев В.П. *Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность.* – М.: Химия, 1992. – 320 с.
6. Lenka Markovičová et al. *UV degradation of polymer-matrix composites PA + GF / Scientific proceedings XII international congress “Machines, technologies, materials”.* – 2015. – Vol.2. – Pp.48-50.
7. Cysne Barbosa A.P., Fulco A.P.P., Guerra E.S.S. et al. *Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites // Compos. Part B Eng.* – 2016. – Vol.110. – Pp.298-306.
8. Babu L.K., Mishra K., Singh R. *Near-fiber effects of UV irradiation on the fiber-matrix interphase: A combined experimental and numerical investigation // Materials & Design.* – 2018. – Vol.157. – Pp.294-302.
9. Jun Zhao, Gaochuang Cai, Lu Cui, Amir Si Larbi and Konstantinos Daniel Tsavdaridis. *Deterioration of Basic Properties of the Materials in FRP-Strengthening RC Structures under Ultraviolet Exposure // Polymers.* – 2017. – Vol.9. – Iss.9. – 402.
10. Bhavesh G. Kumar, Raman P. Singh and Toshio Nakamura. *Degradation of Carbon Fiber-reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation // Journal of Composite Materials.* – 2002. – Vol.36. – No.24. – Pp.2713-2733.
11. Zavatta N., Rondina F., Falaschetti M.P., Donati L. *Effect of Thermal Ageing on the Mechanical Strength of Carbon Fibre Reinforced Epoxy Composites // Polymers.* – 2021. – Vol.13. – Iss.12. – 2006.
12. Agnieszka Bondyra and Tomasz Lusiak. *Analysis of Strength Properties of Carbon Fibre-Reinforced Composites // Transactions on Aerospace Research.* – 2023. – Vol.270. – No.1. – Pp.45-66.
13. EN ISO 4892-1:2016. *Plastics. Methods of Exposure to Laboratory Light Sources.* European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2016. – 25 p.
14. ASTM D 5071-06. *Standard Practice for operating Xenon Arc Type Exposure Apparatus with Water for Exposure of Photodegradable Plastics.* ASTM International, 2021. – 6 p.
15. Sanjay Mazumdar. *Composites Manufacturing Materials, Product and Process Engineering.* – USA Florida: CRC Press, Boca Raton, 2002. – 146 p.

16. Еремин Н.В., Москвичев Е.В., Пасечник К.А. *Экспериментальные исследования ползучести однонаправленного композитного материала металлокомпозитного бака высокого давления* // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и Технологии. – 2021. – Т.14. – №6. – С.731-741.
17. ГОСТ 32656-2017. *Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение*. – М.: Стандартинформ, 2017. – 24 с.
18. Meng Wang and Xiaochen Hang. *Finite Element Analysis of Residual Stress Distribution Patterns of Prestressed Composites Considering Interphases* // Materials. – 2023. – Vol.16. – Iss.4. – 1345.

## REFERENCES

1. Zorin V.A. *Opyt primeneniya kompozitsionnykh materialov v izdeliyakh aviatsionnoj i raketno-kosmicheskoy tekhniki [Experience of application of composite materials in products of aviation and rocket-space technology]*. Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov, 2011, No.4, Pp.44-59.
2. Moskvichev V.V., Testodov N.A. *Nesushhaya sposobnost' i bezopasnost' metallokompozitnykh bakov kosmicheskikh apparatov [Load-bearing capacity and safety of metal-composite vessels for spacecraft]*. Novosibirsk, Nauka, 2021, 440 p.
3. Juan Pablo Márquez Costa, Vincent Legrand and Sylvain Fréour. *Durability of Composite Materials under Severe Temperature Conditions: Influence of Moisture Content and Prediction of Thermo-Mechanical Properties During a Fire* // Journal of Composites Science, 2019, Vol.3, No.2, 55.
4. S. M. Shahabaz et al. *Influence of Temperature on Mechanical Properties and Machining of Fibre Reinforced Polymer Composites: A Review* // Engineered Science, 2021. – Vol. 16. – Pp. 26-46.
5. Ratner S.B., Yarcev V.P. *Fizicheskaya mekhanika plastmass. Kak prognoziryuyut rabotosposobnost' [Physical mechanics of plastics. How performance is predicted]*. Moskva, Khimiya, 1992, 320 p.
6. Lenka Markovičová et al. *UV degradation of polymer-matrix composites PA + GF*. Scientific proceedings XII international congress “Machines, technologies, materials”, 2015, Vol.2, Pp.48-50.
7. Cysne Barbosa A.P., Fulco A.P.P., Guerra E.S.S. et al. *Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites*. Compos. Part B Eng., 2016, Vol.110, Pp.298-306.
8. Babu L.K., Mishra K., Singh R. *Near-fiber effects of UV irradiation on the fiber-matrix interphase: A combined experimental and numerical investigation* // Materials & Design, 2018, Vol.157, Pp.294-302.
9. Jun Zhao, Gaochuang Cai, Lu Cui, Amir Si Larbi and Konstantinos Daniel Tsavdaridis. *Deterioration of Basic Properties of the Materials in FRP-Strengthening RC Structures under Ultraviolet Exposure*. Polymers, 2017, Vol.9, Iss.9, 402.
10. Bhavesh G. Kumar, Raman P. Singh and Toshio Nakamura. *Degradation of Carbon Fiber-reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation* // Journal of Composite Materials, 2002, Vol.36, No.24, Pp.2713-2733.
11. Zavatta N., Rondina F., Falaschetti M.P., Donati L. *Effect of Thermal Ageing on the Mechanical Strength of Carbon Fibre Reinforced Epoxy Composites*. Polymers, 2021, Vol.13, Iss.12, 2006.
12. Agnieszka Bondyra and Tomasz Lusiak. *Analysis of Strength Properties of Carbon*

- Fibre-Reinforced Composites*. Transactions on Aerospace Research, 2023, Vol.270, No.1, Pp.45-66.
13. EN ISO 4892-1:2016. *Plastics. Methods of Exposure to Laboratory Light Sources*. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2016, 25 p.
  14. ASTM D 5071-06. *Standard Practice for operating Xenon Arc Type Exposure Apparatus with Water for Exposure of Photodegradable Plastics*. ASTM International, 2021, 6 p.
  15. Sanjay Mazumdar. *Composites Manufacturing Materials, Product and Process Engineering*. USA Florida, CRC Press, Boca Raton, 2002, 146 p.
  16. Eremin N.V., Moskvichev E.V., Pasechnik K.A. *Ehksperimental'nye issledovaniya polzuchesti odnonapravlennoho kompozitnogo materiala metallokompozitnogo baka vysokogo davleniya [Experimental Studies of Creep of Unidirectional Composite Material of Composite Overwrapped Pressure Vessel]*. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i Tekhnologii, 2021, Vol.14, No.6, Pp.731-741.
  17. GOST 32656-2017. *Kompozity polimernye. Metody ispytaniy. Ispytaniya na rastyazhenie [Polymer composites. Test methods. Tensile tests]*. Moskva, Standartinform, 2017, 24 p.
  18. Meng Wang and Xiaochen Hang. *Finite Element Analysis of Residual Stress Distribution Patterns of Prestressed Composites Considering Interphases*. Materials, 2023, Vol.16, Iss.4, 1345.

Поступила в редакцию 24 апреля 2024 года.

---

Сведения об авторах:

Еремин Никита Викторович – к.т.н., с.н.с. научной лаборатории «Системного инжиниринга и цифровизации», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия; e-mail: [kaizoku813@gmail.com](mailto:kaizoku813@gmail.com)

Москвичев Егор Владимирович – к.т.н., с.н.с. лаборатории «Вычислительной механики и риск-анализа», Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия; e-mail: [jugr@ict.nsc.ru](mailto:jugr@ict.nsc.ru)

Антишин Денис Владимирович – к.т.н., доц. кафедры «Химических технологий твердых ракетных топлив, нефтепродуктов и полимерных композиций», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия; e-mail: [antishindv@sibsau.ru](mailto:antishindv@sibsau.ru)