

УДК 620.1:678.8

Совместное влияние климатических факторов и ударных повреждений на прочность пластин из полимерных композиционных материалов

В.И. Митряйкин, О.Н. Беззаметнов, М.Е. Кузнецов,
Д.А. Носов, А.В. Тажибаева

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ

Combined effect of the climatic factors and impact damage on strength of the polymer composite plates

V.I. Mitryaykin, O.N. Bezzametnov, M.E. Kuznetsov,
D.A. Nosov, A.V. Tazhibaeva

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI

Приведены результаты исследований свойств углепластика совместно с Российско-Вьетнамским тропическим научно-исследовательским и технологическим центром. Определены значения предела прочности и модулей упругости при растяжении и сжатии материала до и после воздействия климатических факторов. Обнаружено уменьшение предела прочности при сжатии и растяжении и увеличение модуля упругости. Оценено влияние влажного климата на прочность пластин с ударными повреждениями при сжатии путем сравнения критических нагрузок с пластинами, имеющими такие же повреждения, но без воздействия климатических факторов. Установлено, что критические нагрузки после длительного пребывания пластин в районах с влажным климатом уменьшаются.

EDN: RPIIFE, <https://elibrary/rpiife>

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, климатические испытания, неразрушающий контроль, ударные повреждения, прочность пластин

The paper presents results of studying properties of the B180 carbon fiber after exposure to the humid climate conditions. The study was conducted together with the Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center. The ultimate strength and elastic moduli values under tension and compression of the material before and after exposure to the climatic factors were determined. A decrease in the ultimate strength under compression and tension, and an increase in the elasticity modulus were found. The effect of humid climate on the strength of plates with the impact damage under compression was estimated by comparing critical loads with plates having the same damage, but without exposure to the climatic factors. It was found that critical loads after a long stay in areas with the humid climate were decreasing.

EDN: RPIIFE, <https://elibrary/rpiife>

Keywords: polymer composite materials, climatic testing, non-destructive testing, impact damage, plate strength

В программах развития зеленой энергетики России на 2025–2035 гг. особое внимание уделено транспортной инфраструктуре и обеспечению электроэнергией регионов Дальнего Востока и Северного морского пути [1]. Разработан механизм поддержки производства, генерирующего оборудование на основе возобновляемых источников энергии с целью создания генерирующих объектов и полноценного научно-производственного комплекса, связанного с разработкой, внедрением, опытным и серийным производством компонентов энергетического оборудования для возобновляемых источников энергии, включая ветрогенераторы (ВГ), которые работают в сложных природных условиях.

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в электрогенераторах решает задачи, связанные с уменьшением массы и стойкости агрегатов к различным погодным и климатическим факторам, что влияет на их ресурс [2, 3].

Лопастей — самые важные элементы ВГ, предназначенные для создания крутящего момента на валу ВГ путем воздействия на них давления, создаваемого ветровым потоком и аэродинамической составляющей. Для изготовления лопастей ВГ применяют стекловолокно, однако в настоящее время идет разработка технологии изготовления ВГ из углеродного волокна. Углепластики обладают повышенными эксплуатационными характеристиками, жесткостью и удельной прочностью.

В работе [4] показано, что применение углеволокна в ветровой установке приводит к уменьшению ее массы, повышению прочности, долговечности и обеспечивает защиту от обледенения. Установлено, что для лопастей ветровых турбин длиной более 40 м использование углеволокна позволит снизить массу конструкции на 30...40 %, повысить прочностные, жесткостные характеристики и улучшить противобледенительные свойства лопастей турбин.

Существенное влияние на ПКМ в процессе длительной эксплуатации изделий оказывают климатические факторы: температура и относительная влажность воздуха, атмосферные осадки, солнечная радиация, циклическое изменение температуры внешней среды, что может вызвать снижение прочностных характеристик материалов [5].

Для обеспечения безопасной эксплуатации ВГ с деталями из ПКМ необходимо понимать, как изменяются свойства ПКМ под действием

климатических и эксплуатационных факторов. Наиболее опасными эксплуатационными дефектами ПКМ являются ударные повреждения вследствие ударов града или кусков льда, оторвавшихся при обогриве лопастей, а также при ударе молнии. Такие трудно обнаруживаемые при визуальном осмотре дефекты способны существенно снизить прочность конструкции.

Разработка новых материалов требует предварительной экспериментальной оценки их способности сохранять свойства в течение заданного срока службы в климатических условиях. Параллельно с разработкой новых материалов необходимо развивать методы климатических испытаний для оценки деградации свойств материалов под действием тех или иных климатических факторов.

Прогнозирование срока службы ПКМ при воздействии факторов внешней среды включает в себя несколько этапов. На первом необходимо выполнить лабораторные исследования в климатических камерах, на втором — провести испытания материалов в различных климатических зонах. Это позволит оценить динамику изменения свойств материалов после длительной экспозиции в естественных условиях.

В работе [6] приведены результаты исследований свойств углепластика ВКУ-51 и стеклопластика ВПС-58, изготовленных на основе эпоксивинилэфирного связующего ВСВ-43, после экспозиции в натуральных условиях умеренного и субтропического климата в течение 5 лет с промежуточными съемами после 1 года и 3 лет. Определены физико-механические характеристики (прочность и модуль упругости при растяжении, сжатии и изгибе) и температура стеклования.

Вопросам старения ПКМ в естественных условиях различных климатических зон посвящены работы [7, 8]. Актуальность исследования свойств ПКМ после проведения экспозиции на естественной площадке подтверждают данные зарубежных авторов [9, 10].

Кроме климатических факторов лопасти ВГ подвержены ударам града и льда. Это приводит к появлению таких дефектов на поверхности, как микротрещины, которые могут способствовать влагопоглощению и, как следствие, разрушению материала. В течение срока службы едва видимые повреждения от ударов довольно трудно обнаружить при визуальном осмотре [11, 12]. В настоящее время широко распространены методы неразрушающего контроля,

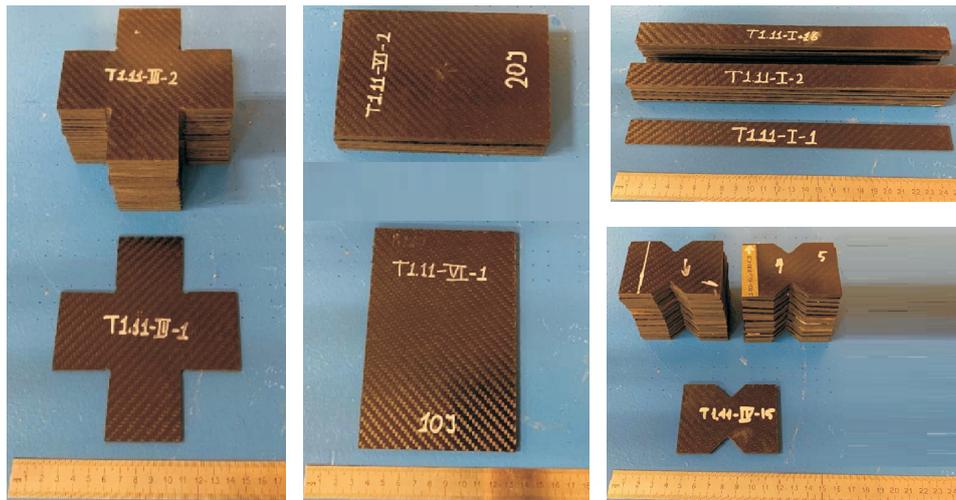


Рис. 1. Внешний вид готовых образцов ПКМ перед отправкой в Тропический центр

благодаря которым можно оценить характер внутренних разрушений, определить их размеры и принять надлежащие решения по продолжению эксплуатации или ремонту.

Проблемы, связанные с тем, насколько влажная среда и ударные повреждения приводят к ухудшению механических характеристик конструкций из ПКМ, являются актуальной задачей.

Цель работы — исследование физико-механических свойств углепластика В-180 после длительной экспозиции в различных климатических зонах, что позволит оценить влияние климатических факторов и ударных повреждений на прочность пластин из ПКМ.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования выступали образцы из углепластика на основе препрега В180 саржевого переплетения с направлением волокон $0^\circ/90^\circ$. Этот материал, обладающий высокими эксплуатационными характеристиками, предназначен для деталей, эксплуатируемых при температуре до 150°C . В качестве связующего использовали эпоксидную композицию того же производителя.

Для изготовления заготовок применяли метод вакуумно-печного формования образцов пластин из десяти слоев препрега с использованием вакуумного мешка. Удаление технологического припуска, нарезку образцов проводили на станке с ЧПУ. Для исследования влияния на прочность ударных повреждений и климатических факторов изготавливали пластины толщиной 4 мм из двадцати слоев. Создавали образцы для определения модуля упругости, пре-

дела прочности при сжатии и растяжении, предела прочности при межслоевом сдвиге, модуля упругости и предела прочности при трехточечном изгибе.

Внешний вид готовых образцов перед отправкой в Тропический центр показан на рис. 1.

Для создания ударного воздействия на образцы использована ударная машина с вертикально-падающим грузом Instron Dunatur 9250HV. Эта ударная машина оснащена чувствительным пьезометрическим датчиком нагрузки с точностью $\pm 1\%$ измеряемого диапазона, ударным наконечником диаметром 16 мм и пневматической системой предотвращения повторного удара. Необходимая энергия удара достигается подъемом взвешенного груза на определенную высоту. Методика проведения эксперимента создана с учетом отраслевых стандартов испытаний композиционных материалов.

Образцы с ударными повреждениями после воздействия с энергией удара $G = 10, 20$ и 30 Дж показаны на рис. 2.

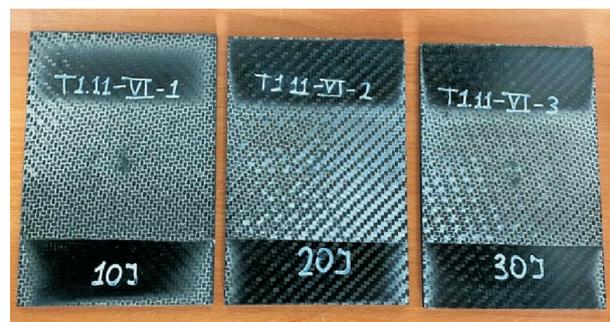


Рис. 2. Внешний вид образцов с ударными повреждениями

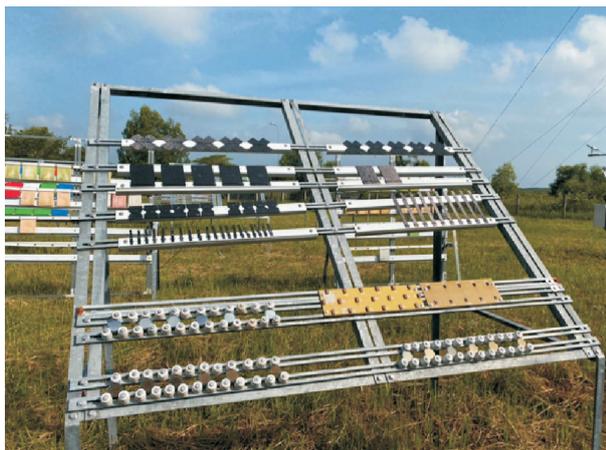


Рис. 3. Внешний вид стенда для экспонирования образцов на площадке КанЗе

Изготовленные образцы были переданы в Тропический центр для экспонирования в условиях трех тропических климатических зон Вьетнама на площадках Хоа Лак (г. Ханой), КанЗе (г. Хошимин) и Домбай (г. Нячанг). Образцы размещали на металлических стеллажах лицевой стороной к югу под углом 45° и экспонировали на протяжении трех лет, как показано на рис. 3. Для другой половины образцов запланирована экспозиция продолжительностью 5 лет.

На протяжении всего времени экспонирования проводили непрерывный сбор данных (циклограмм) температуры и относительной влажности на позициях размещения экспонируемых образцов для трех испытательных станций приборами измерения температуры и относительной влажности НОВО. Ежедневно

фиксируют время и степень воздействия солнечной активности (в ультрафиолетовой части спектра излучения) и дождевого воздействия (при наличии) на образцы. Средние термодинамические параметры состояния внешней среды на каждый год экспонирования приведены в табл. 1.

Результаты и обсуждение. Внешний осмотр образцов ПКМ после экспозиции показал различное состояние лицевой и тыльной поверхностей. Лицевой стороной считалась сторона, обращенная к солнцу при экспонировании на атмосферном стенде. Лицевая поверхность на всех плитах оказалась более поврежденной, чем тыльная (теневая). На лицевой стороне в большей степени наблюдались деградация полимерной матрицы и эрозионные повреждения волокон. Физико-механические характеристики образцов из препрега В180, полученные после испытаний, приведены в табл. 2.

После экспозиции образцов на трех площадках их испытывали под действием повышенных температуры и влажности в Испытательной лаборатории прочности и надежности летательных аппаратов (ИЛ ПНК ЛА) Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. Физико-механические характеристики образцов из препрега В180 после испытаний на различных площадках приведены в табл. 3, где ПД — паспортные данные; σ_v — предел прочности; E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона; ε — относительная деформация.

Таблица 1

Средние термодинамические параметры состояния внешней среды

Год	Испытательная станция	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Давление, ГПа
2020	Хоа Лак	26,0	80,0	1018,1
	КанЗе	31,2	70,0	1011,0
	Домбай	27,7	75,4	1008,7
2021	Хоа Лак	25,6	88,2	1013,9
	КанЗе	29,7	74,5	976,5
	Домбай	27,1	68,3	1008,3
2022	Хоа Лак	25,4	88,6	978,5
	КанЗе	29,9	74,9	1009,8
	Домбай	27,0	79,9	1007,6

Таблица 2

Физико-механические характеристики образцов из препрега В180 после испытаний

Характеристика	Значение
Предел прочности, МПа:	
при растяжении	924,842
при сжатии	744,969
Модуль упругости, ГПа:	
при растяжении	68,945
при сжатии	62,734
Относительное удлинение, %	1,5
Относительная деформация при сжатии, %	1,18

Из табл. 3 следует, что под действием повышенной температуры и влажности у образцов из препрега В180 уменьшаются предел прочности и относительная деформация, увеличиваются модуль упругости и коэффициент Пуассона. На станции Домбай предел прочности при растяжении образцов снизился на 16 %, на станции Хоа Лак — на 23 %, на станции КанЗе — на 9 %. Модуль упругости повысился на 7, 6 и 11 % на станции Домбай, Хоа Лак и КанЗе соответственно.

Исследование совместного влияния ударных повреждений и климатических факторов на прочностные характеристики конструкции представляет собой более сложную задачу. Вопросы воздействия различных факторов и учет деградации материала от климатических факторов на механические характеристики композиционных конструкций рассмотрены в работах [13–16]. Там дан обзор математических и экспериментальных методов оценки деградации свойств материалов.

Ударные повреждения композиционных конструкций являются одной из основных про-

блем при оценке эксплуатационной прочности лопастей ВГ. Такие внешне малозаметные повреждения могут вызывать значительные внутренние разрушения слоев ПКМ, что ведет к снижению прочности всей конструкции. Согласно рекомендациям нормативных документов, повреждение не должно снижать прочность конструкции ниже расчетных значений под действием эксплуатационных нагрузок. Размеры ударных повреждений зависят от характеристик материала и энергии удара. Приближенно их определяют расчетным путем, а действительные значения уточняют в ходе экспериментальных исследований [17–19].

Выполнена сравнительная оценка прочностных характеристик при сжатии пластин с ударными повреждениями до и после экспозиции во влажном климате. Испытания проведены в соответствии с ГОСТ 33495–2015 (Метод испытания на сжатие после удара).

До начала испытаний определяли размеры повреждений с фиксацией глубины δ и площади S отпечатка в зависимости от энергии удара. Размер отпечатка фиксировали сразу после удара. Для определения глубины вмятины использовали микрометр с индикаторной головкой Mitutoyo ID-C112. Геометрические характеристики вмятины измеряли в трех плоскостях с помощью координатно-измерительной машины CimCore 5100 INFINITE 2.0, имеющей погрешность измерения координат точки пространства, равную 0,02 мм. Сбор данных с объекта измерения проводили лазерной сканирующей головкой Percerptron Scan Works.

Картина распределения отклонений геометрических характеристик образца с вмятиной (после удара с энергией 20 Дж) от номинальной плоскости показана на рис. 4. Максимальная глубина ударного повреждения составила 0,335 мм.

Таблица 3

Физико-механические характеристики образцов из препрега В180 после испытаний на различных площадках

Испытательная станция	σ_b , МПа	E , ГПа	μ	ϵ , %
ПД	871,00/802,00	71,00/60,00	–/–	–/–
ИЛ ПНК ЛА	924,84/744,97	68,95/62,73	0,0460/–	1,5000/1,1800
Домбай	769,39/632,65	73,81/62,80	0,0596/0,0373	1,0517/1,1944
Хоа Лак	704,48/586,62	73,36/74,57	0,0612/0,0416	1,0007/1,0043
КанЗе	835,11/611,05	77,16/67,85	0,0526/0,0568	0,9971/1,0819

Примечание. В числителе дроби указаны значения при растяжении образцов, в знаменателе — при их сжатии.

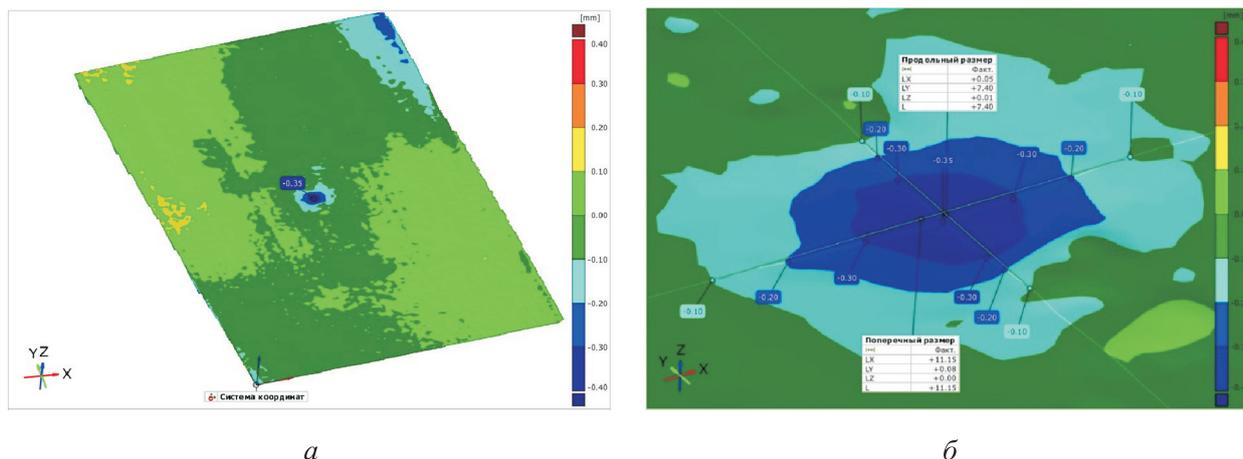


Рис. 4. Картина распределения отклонений геометрических параметров образца с вмятиной от номинальной плоскости (а) и ее увеличенный фрагмент (б)

Расчет площади пятна отпечатка после ударного взаимодействия проведен в системе автоматизированного проектирования КОМПАС 3D. Расчет выполнен графическим методом. На развертке С-скана присутствует линейка, которая совмещается с координатной сеткой этой системы, затем отмечается поврежденная зона образца и выполняется расчет площади повреждений.

Глубина и площадь повреждений углепластика В180 измерены при энергии удара $G = 10, 20$ и 30 Дж без воздействия влажного климата с целью последующей оценки их релаксации после длительной экспозиции во влажном климате. Анализ таких исследований, связанных с релаксацией ПКМ, выполнен в работе [20]. Отмечено, что размеры вмятин могут уменьшаться в результате длительного пребывания в условиях влажного климата. Это было подтверждено результатами измерения размеров ударных повреждений до и после длительной экспозиции образцов, приведенными в табл. 4, где δ^k и S^k — глубина и площадь вмятины после экспозиции; $\Delta\delta$ и ΔS — относительная погрешность между глубинами и площадями вмятины до и после экспозиции соответственно.

После экспозиции глубина вмятины δ^k во влажном климате стала меньше на $31...39\%$, чем до экспозиции δ . Площадь повреждения после экспозиции S^k изменилась незначительно по сравнению с ее значением до экспозиции S . Видимые повреждения на поверхности образцов не дают полного представления о разрушениях внутри материала, поэтому зону повреждений образцов оценивали ультразвуковым методом.

Результаты сканирования позволили более подробно определить площадь внутренних разрушений при различных значениях энергии удара. Исследования проводили с помощью комплекса неразрушающего полуавтоматического контроля OmniScan MX2 с датчиком $3,5$ МГц и фазированными решетками. Сканирование образцов выполняли при полном погружении в контактную жидкость. Ультразвуковой комплекс, обрабатывая массив сканов, строил двумерное изображение объекта в плане, которое использовали для оценки площади повреждений после удара.

Результаты ультразвукового сканирования образцов с ударными повреждениями, нанесенными при различных значениях энергии

Таблица 4

Результаты измерения размеров ударных повреждений до и после экспозиции образцов во влажном климате

G , Дж	δ , мм	δ^k , мм, мм	$\Delta\delta$, %	S , мм ²	S^k , мм ²	ΔS , %
10	0,154	0,103	33,1	103,6	98,7	4,7
20	0,335	0,203	39,4	244,9	238,3	2,7
30	0,669	0,460	31,2	386,5	374,2	3,2

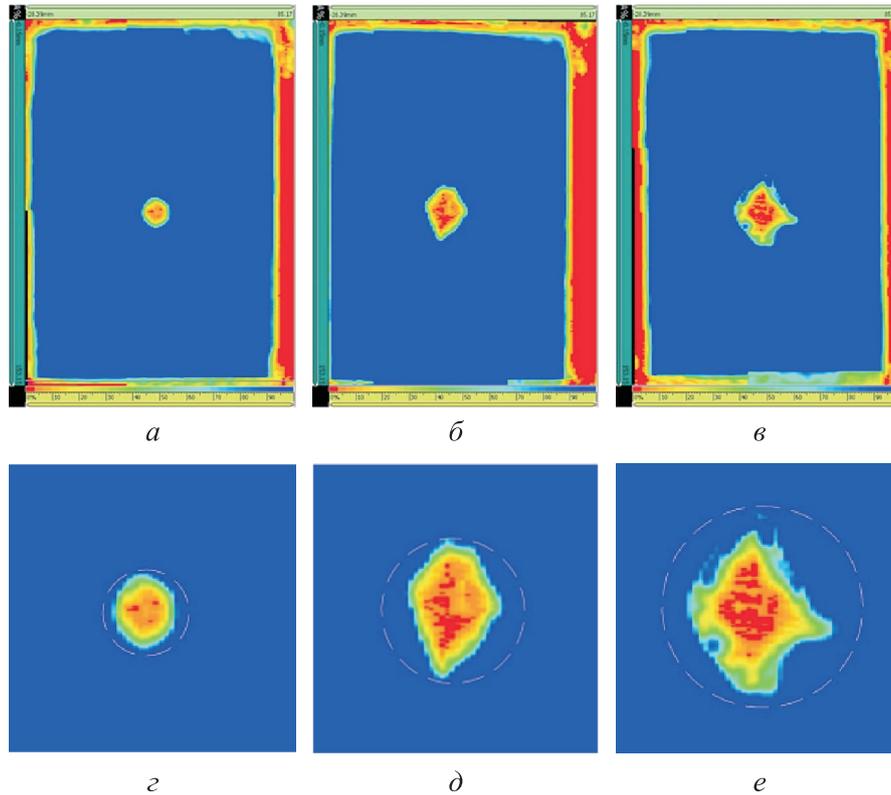


Рис. 5. Результаты ультразвукового сканирования образцов после ударного воздействия (а–в) и картины увеличенных поврежденных зон (г–е):
а, г — $G = 10$ Дж, $d_{\text{экв}} = 15$ мм; б, д — $G = 20$ Дж, $d_{\text{экв}} = 25$ мм; в, е — $G = 30$ Дж, $d_{\text{экв}} = 30$ мм

удара, после экспозиции во влажном климате и характер локальных дефектов приведены на рис. 5. Видно, что с увеличением энергии удара размеры повреждений возрастают. Штриховой линией на увеличенных картинах повреждений показаны максимальные диаметры поврежденных зон.

Отношение максимальной площади повреждения к размеру пластины составляет 2,5 %. Эти результаты можно использовать при прочностных расчетах с применением критерия эквивалентных отверстий или при планировании ремонта. Поврежденность и дефектность структуры в используемых моделях сводится к созданию эквивалентного концентратора напряжений в образце в виде сквозного отверстия.

Алгоритм выбора размера эквивалентного отверстия $d_{\text{экв}}$ представляет собой достаточно сложную задачу, так как для слоистых композитов внутренние расслоения и нарушения структуры значительно превышают визуально обнаруженные размеры вмятин. Поэтому моделирование напряженно-деформированного состояния должно подкрепляться экспериментальными данными с использованием систем

неразрушающего контроля, что позволит получать достоверные результаты при проектировании композиционных конструкций.

Испытания образцов, имеющих ударные повреждения под действием сжимающей нагрузки, проводили на электромеханической универсальной испытательной машине Instron 5882 с регистрирующим программно-аппаратным комплексом Instron 5800. Наибольшая нагрузка, которую может воспроизводить испыта-

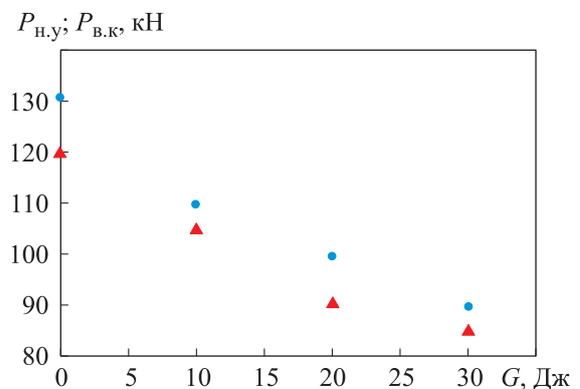


Рис. 6. Зависимости максимальной нагрузки при сжатии пластин в нормальных условиях $P_{n,y}$ (●) и после трех лет экспозиции во влажном климате $P_{v,k}$ (▲) от энергии удара G

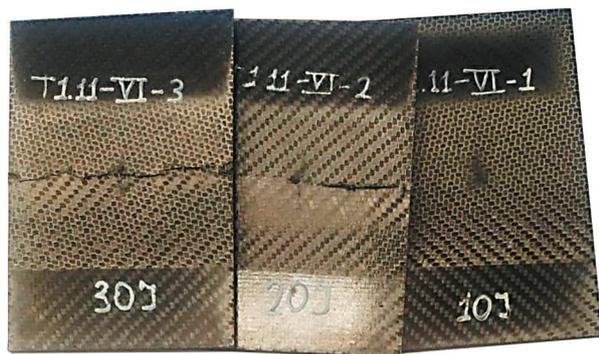


Рис. 7. Внешний вид образцов с ударными повреждениями после сжатия

тельная машина, составляет 100 кН. Для измерения значений нагрузки применяли силоизмерительный тензометрический датчик Instron с точностью измерения силы сжатия $\pm 0,15\%$.

Деформацию образца при сжатии определяли с помощью датчика перемещения траверсы, которая давила на образец. При разрушении образца измеряли наибольшую нагрузку сжатия и предел прочности при сжатии после удара σ_v . В первую очередь фиксировали критическую нагрузку разрушения пластин при сжатии без повреждений. Далее испытывали образцы при большей энергии удара и находили падение нагрузки — параметр, характеризующий величину постударной несущей способности материала. По полученным данным строили диаграммы снижения прочностных характеристик различных образцов с повреждениями.

Зависимости максимальной нагрузки при сжатии пластин в нормальных условиях $P_{н.у}$ и после трех лет экспозиции во влажном климате $P_{в.к}$ от энергии удара G приведены на рис. 6.

Характер разрушения пластин при сжатии с энергией удара $G = 10, 20$ и 30 Дж показан на рис. 7. Тип разрушения — поперечный, разрушение — в середине образца.

Установлено, что экспозиция во влажном климате образцов углепластика В180 с ударными повреждениями на $5...9\%$ снижает критическую нагрузку и предел прочности при сжатии.

Выводы

1. Приведены результаты исследования свойств углепластика В180 после экспозиции в натуральных условиях в течение 3 лет в трех тропических климатических зонах с влажным климатом Вьетнама. Определены изменения физико-механических характеристик материала (предела прочности и модуля упругости при растяжении и сжатии образцов) относительно данных до экспозиции.

2. Исследованы геометрические размеры ударных повреждений образцов, полученных при энергии удара 10, 20 и 30 Дж. Установлено влияние на них релаксации в результате климатического старения.

3. Испытания образцов с ударными повреждениями, полученными под действием сжимающей нагрузки, показали, что после их пребывания во влажном климате предел прочности при сжатии снижается.

4. Результаты исследования можно использовать для оценки изменения физико-механических характеристик материала лопастей ВГ, эксплуатируемых во влажном климате.

Литература

- [1] Национальная программа развития Дальнего Востока. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2020 года № 2464-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/NAISPJ8QMRZUPd9LIMWJoeVhn1l6eGqD.pdf>
- [2] Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор). *Авиационные материалы и технологии*, 2018, № 2, с. 47–58, doi: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58>
- [3] Стонтон Р. Влияние окружающей среды на свойства композиционных материалов. В: *Справочник по композиционным материалам*. Кн. 2. Москва, Машиностроение, 1988, с. 280–301.
- [4] Окольникова Г.Э., Бронников Д.А., Щедрин Н.И. Использование углеродного волокна в конструкциях ветровых электростанций. *Системные технологии*, 2018, № 27, с. 60–63.
- [5] Лаптев А.Б., Барботька С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохранности свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатаци-

- онных факторов. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № S, с. 547–561, doi: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561>
- [6] Евдокимов А.А., Петрова А.П., Павловский К.А. и др. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксивинилэфирного связующего. *Труды ВИАМ*, 2021, № 3, с. 128–136, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136>
- [7] Гладких А.В., Курс И.С., Курс М.Г. Анализ данных натуральных климатических испытаний, совмещенных с приложением эксплуатационных факторов, неметаллических материалов (обзор). *Труды ВИАМ*, 2018, № 10, с. 74–82, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82>
- [8] Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д. и др. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ. *Авиационная промышленность*, 2009, № 4, с. 36–46.
- [9] Belec L., Nguyen T.H., Nguyen D.L. et al. Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2015, vol. 68, pp. 235–241, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.028>
- [10] Gu X., Dickens B., Stanley D. et al. Linking accelerating laboratory test with outdoor performance results for a model epoxy coating system. In: Service life prediction of polymeric materials. *Springer*, 2009, pp. 3–28, doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-84876-1_1
- [11] Lopresto V., Caprino G. Damage mechanisms and energy absorption in composite laminates under low velocity impact loads. In: Dynamic failure of composite and sandwich structures. *Springer*, 2013, pp. 209–289, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-007-5329-7_6
- [12] Malhotra A., Guild F.J. Impact damage to composite laminates: effect of impact location. *Appl. Compos. Mater.*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 165–177, doi: <https://doi.org/10.1007/s10443-013-9382-z>
- [13] Доан Чак Луат, Дудченко А.А., Лурье С.А. Моделирование деградации свойств композита при растрескивании и расслоении при статическом и циклическом нагружении. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2008, т. 14, № 4, с. 623–637.
- [14] Бохоева Л.А. Особенности расчета на прочность элементов конструкций из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами. Улан-Удэ, Изд-во ВСГТУ, 2007. 191 с.
- [15] Muc A., Stawiarski A. Identification of damages in composite multilayered cylindrical panels with delamination's. *Compos. Struct.*, 2012, vol. 94, no. 5, pp. 1871–1879, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.026>
- [16] Paimushin V.N., Kayumov R.A., Kholmogorov S.A. Degradation of the mechanical properties of fiber reinforced plastic under cyclic loading. *Mech. Compos. Mater.*, 2023, vol. 59, no. 2, pp. 371–380, doi: <https://doi.org/10.1007/s11029-023-10101-1>
- [17] Ерасов В.С., Крылов В.Д., Панин С.В. и др. Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом. *Авиационные материалы и технологии*, 2013, № 3, с. 60–64.
- [18] Митряйкин В.И., Беззаметнов О.Н., Кротова Е.В. Исследование прочности композиционных материалов с ударными повреждениями. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2020, т. 63, № 3, с. 27–33.
- [19] Чулков Д.И., Терехин А.В., Типикин М.Е. и др. Ультразвуковой контроль качества пропитки стеклопластиковых элементов конструкций летательных аппаратов органическими смолами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 3, с. 46–54. EDN: IUJOZB
- [20] Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н. и др. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие. *Авиационные материалы и технологии*, 2021, № 4, с. 70–80, doi: <https://doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80>

References

- [1] *Natsionalnaya programma razvitiya Dalnego Vostoka*. Rasporyazhenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 24 sentyabrya 2020 goda no. 2464-r. URL: <http://static.government.ru/media/files/NAISPJ8QMRZUPd9LIMWJoeVhn1l6eGqD.pdf>

- [2] Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2018, no. 2, pp. 47–58, doi: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58> (in Russ.).
- [3] Stonton R. Vliyanie okruzhayushchey sredy na svoystva kompozitsionnykh materialov [Environmental effects on the properties of composite materials]. V: *Spravochnik po kompozitsionnym materialam*. Kn. 2 [In: Handbook of composite materials. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, pp. 280–301. (In Russ.).
- [4] Okolnikova G.E., Bronnikov D.A., Shchedrin N.I. Using a carbon fiber in the constructions of wind power stations. *Sistemnye tekhnologii* [System Technologies], 2018, no. 27, pp. 60–63. (In Russ.).
- [5] Laptev A.B., Barbotka S.L., Nikolaev E.V. The main research areas of the persistence properties of materials under the influence of climatic and operational factors. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. 5, pp. 547–561, doi: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-5-547-561> (in Russ.).
- [6] Evdokimov A.A., Petrova A.P., Pavlovskiy K.A. et al. The influence of climatic ageing on the properties of PCM-based epoxy resin systems. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2021, no. 3, pp. 128–136, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136> (in Russ.).
- [7] Gladkikh A.V., Kurs I.S., Kurs M.G. Analysis of the data of full-scale climatic tests combined with the application of operational factors of nonmetallic materials (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018, no. 10, pp. 74–82, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82> (in Russ.).
- [8] Kablov E.N., Kirillov V.N., Zhirnov A.D. et al. Centres for climatic testing of aircraft PCMs. *Aviatsionnaya promyshlennost* [Aviation Industry], 2009, no. 4, pp. 36–46. (In Russ.).
- [9] Belec L., Nguyen T.H., Nguyen D.L. et al. Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2015, vol. 68, pp. 235–241, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.028>
- [10] Gu X., Dickens B., Stanley D. et al. Linking accelerating laboratory test with outdoor performance results for a model epoxy coating system. In: *Service life prediction of polymeric materials*. Springer, 2009, pp. 3–28, doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-84876-1_1
- [11] Lopresto V., Caprino G. Damage mechanisms and energy absorption in composite laminates under low velocity impact loads. In: *Dynamic failure of composite and sandwich structures*. Springer, 2013, pp. 209–289, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-007-5329-7_6
- [12] Malhotra A., Guild F.J. Impact damage to composite laminates: effect of impact location. *Appl. Compos. Mater.*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 165–177, doi: <https://doi.org/10.1007/s10443-013-9382-z>
- [13] Doan Chak Luat, Dudchenko A.A., Lurye S.A. Modeling of the properties degradation due to cracking and delamination for the static and cyclic loadings. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 623–637. (In Russ.).
- [14] Bokhoeva L.A. *Osobennosti rascheta na prochnost elementov konstruksiy iz izotropnykh i kompozitsionnykh materialov s dopustimymi defektami* [Peculiarities of strength calculation of structural elements made of isotropic and composite materials with permissible defects]. Ulan-Ude, Izd-vo VSGTU Publ., 2007. 191 p. (In Russ.).
- [15] Muc A., Stawiarski A. Identification of damages in composite multilayered cylindrical panels with delamination's. *Compos. Struct.*, 2012, vol. 94, no. 5, pp. 1871–1879, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.026>
- [16] Paimushin V.N., Kayumov R.A., Kholmogorov S.A. Degradation of the mechanical properties of fiber reinforced plastic under cyclic loading. *Mech. Compos. Mater.*, 2023, vol. 59, no. 2, pp. 371–380, doi: <https://doi.org/10.1007/s11029-023-10101-1>
- [17] Erasov V.S., Krylov V.D., Panin S.V. et al. Drop-weight impact testing of polymer composite material. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2013, no. 3, pp. 60–64. (In Russ.).
- [18] Mitryaykin V.I., Bezzametnov O.N., Krotova E.V. The study of strength of composites under impact. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika*, 2020, t. 63, no. 3, pp. 27–33. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Aeronaut.*, 2020, vol. 63, no. 3, pp. 397–404, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068799820030046>)

- [19] Chulkov D.I., Terekhin A.V., Tipikin M.E. et al. Ultrasonic quality control of the aerial vehicle fiberglass structural elements impregnation with the organic resins. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 3, pp. 46–54. EDN: IUJOZB (in Russ.).
- [20] Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N. et al. Relaxation of polymer composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2021, no. 4, pp. 70–80, doi: <https://doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 15.10.2024

Информация об авторах

МИТРИЙКИН Виктор Иванович — доктор технических наук, профессор кафедры машиноведения и инженерной графики. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: vmitryaykin@bk.ru).

БЕЗЗАМЕТНОВ Олег Николаевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры производства летательных аппаратов. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: bezzametnovoleg@mail.ru).

КУЗНЕЦОВ Михаил Евгеньевич — ведущий инженер ИЛ ПНК ЛА ИАТТ. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: mekuznetsov@kai.ru).

НОСОВ Дмитрий Александрович — ведущий инженер. ИЛ ПНК ЛА ИАТТ. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: danosov@kai.ru).

ТАЖИБАЕВА Александра Валерьевна — ассистент кафедры машиноведения и инженерной графики. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: alekkuzmina@mail.ru).

Information about the authors

MITRAYKIN Viktor Ivanovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Mechanical Science and Engineering Graphics. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420011, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: vmitryaykin@bk.ru).

BEZZAMETNOV Oleg Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Department of Aircraft Production. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420011, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: bezzametnovoleg@mail.ru).

KUZNETSOV Mikhail Evgenievich — Leading Engineer, IL PNC LA IATT. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420011, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: mekuznetsov@kai.ru).

NOSOV Dmitry Alexandrovich — Leading Engineer, IL PNC LA IATT. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420011, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: danosov@kai.ru).

TAZHIBAeva Alexandra Valerievna — Assistant, Department of Mechanical Science and Engineering Graphics. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420011, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: alekkuzmina@mail.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Митрийкин В.И., Беззаметнов О.Н., Кузнецов М.Е., Носов Д.А., Тажибаева А.В. Совместное влияние климатических факторов и ударных повреждений на прочность пластин из полимерных композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 7, с. 114–124.

Please cite this article in English as:

Mitryaykin V.I., Bezzametnov O.N., Kuznetsov M.E., Nosov D.A., Tazhibaeva A.V. Combined effect of the climatic factors and impact damage on strength of the polymer composite plates. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 7, pp. 114–124.