

УДК 629.7.083

Е.А. Вешкин<sup>1</sup>, В.О. Старцев<sup>1</sup>, В.И. Постнов<sup>1</sup>, А.А. Баранников<sup>1</sup>

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАК ОЦЕНКА РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-98-108

*Исследованы механические характеристики и показатели влагопереноса монолитных и трехслойных сотовых образцов на основе углепластика ВКУ-30К.Р14535 в исходном состоянии, после механического ударного повреждения, после ремонта и натурных климатических испытаний в условиях умеренно теплого климата. Освещена проблема «чувствительности» полимерных композиционных материалов (ПКМ) к ударным повреждениям. Отмечены результаты научно-исследовательской работы по исследованию свойств ряда ПКМ авиационного назначения с механическими повреждениями в различных климатических условиях.*

**Ключевые слова:** углепластик, трехслойные сотовые конструкции, ударные повреждения, ремонт, прочность при сжатии, влагоперенос.

Е.А. Veshkin<sup>1</sup>, V.O. Startsev<sup>1</sup>, V.I. Postnov<sup>1</sup>, A.A. Barannikov<sup>1</sup>

## THE CLIMATE IMPACTS AS THE ASSESSMENT OF MAINTAINABILITY OF PRODUCTS FROM CARBON FIBER

*The article is devoted to the study of mechanical characteristics and indicators of moisture transfer of monolithic and three-layer cellular samples based on carbon fiber VKU-30K.P14535 in the initial state, after mechanical shock damage, after repair and full-scale climatic tests in a moderately warm climate. The problem of «sensitivity» of polymer composite material (PCM) to shock damage is highlighted. The results of research work on the study of the properties of a number of aircraft PCM with mechanical damage in different climatic conditions are noted.*

**Keyword:** CFRP, composite honeycomb sandwich constructions, drop-weight, repair, compressive strength, moisture absorption.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Композиционные материалы, без сомнения, можно отнести к категории наиболее востребованных продуктов современного промышленного производства. В первую очередь их применяют в высокотехнологичных отраслях, в том числе авиационно-космической [1].

Рост объемов применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) нового поколения в конструкциях авиационной техники (АТ) актуализирует и выводит на первый план обеспечение ее безопасности, надежности и экономической эффективности. При этом значительно увеличивается объем работ, связанных с ее обслуживанием и ремонтом. Одной из причин роста является особенность ПКМ – их высокая «чувствительность» (снижение показателей прочности) к ударным воздействиям, характерным для эксплуатации АТ в различных климатических условиях [2–28]. Следует отметить, что отсутствуют статистические данные по изменению свойств ПКМ нового поколения

при эксплуатации в составе конструкции АТ, что делает невозможным прогнозирование поведения ПКМ при их эксплуатации. При этом сведения об изменении механических свойств ПКМ нового поколения в реальных условиях эксплуатации представляют большой интерес для специалистов различного профиля [29, 30]

С учетом вышеизложенного проведены работы по исследованию свойств ряда ПКМ авиационного назначения с механическими повреждениями в различных климатических условиях. В работах [16–18, 25] представлены результаты, которые показали, что в монолитных образцах с механическими повреждениями коэффициент диффузии и предельное влагонасыщение возрастают на 20–70%. При этом после экспонирования в течение 6–18 мес в четырех климатических зонах разрушающее напряжение при сжатии уменьшается на 5–7%. Проведенные исследования также показали, что на начальном этапе экспонирования пяти марок ПКМ среднее изменение коэффициента диффузии влаги в 5 раз больше, а после 18 мес экспонирования – в 3 раза превышает изменение предела прочности при сжатии.

На основе этих исследований разработан стандарт организации СТО 1-595-591-483–2015 «Климатические испытания ПКМ с регламентированными повреждениями при ударе» [24].

Большой практический интерес, наряду с оценкой повреждений элементов конструкции АТ в результате механических ударных нагрузок, представляет определение состояния поврежденных конструкций из ПКМ после восстановительного ремонта с оценкой их климатической стойкости.

Ремонт является одним из четырех важнейших элементов, влияющих на повышение эксплуатационной надежности АТ и, как следствие, на увеличение ее эффективности. В этой связи исследованы механические характеристики и показатели влагопереноса монолитных и трехслойных сотовых образцов на основе углепластика ВКУ-30К.Р14535 в исходном состоянии, после механического ударного повреждения и после ремонта с учетом климатического воздействия.

### Материалы и методы

Для проведения исследований изготовлены монолитные образцы из углепластика ВКУ-30К.Р14535, чей вид и габаритные размеры регламентируются требованиями, указанными в ГОСТ 33496–2015 «Испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом», а также ГОСТ 33495–2015 (ASTM D7136/D7136M) «Механические испытания на сжатие после удара». Образцы выполнены длиной  $150 \pm 0,25$  мм, шириной  $100 \pm 0,25$  мм, толщиной  $4,5 \pm 0,25$  мм с квазиизотропной схемой армирования  $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{32}$  (рис. 1, а). Углепластик изготовлен из клевого препрега марки КМКУ-3м.150.Р14535.45 (ТУ1-595-14-1304–2012).

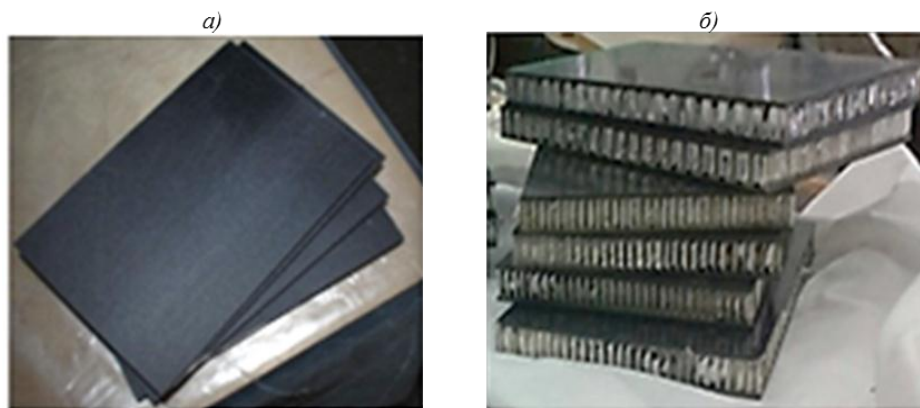


Рис. 1. Внешний вид монолитных образцов из углепластика ВКУ-30К.Р14535 (а) и трехслойных сотовых образцов (б)

Изготовлены также трехслойные сотовые образцы (рис. 1, б) с обшивкой из клеевых препрегов КМКУ-3м.150.P14535.45 и КМКС-4м.175.T64.55 (ТУ1-595-14-1065–2009) и алюминиевого сотового заполнителя АМг2-Н-2,5-30 (01-11-10) (ОСТ1 00728–75). Препрег КМКС-4м.175.T64.55 является защитным слоем между углеродным наполнителем и алюминиевым сотовым заполнителем – для исключения разрушения углеродных волокон от соприкосновения их с сотовым заполнителем при формовании и защиты их от коррозии в процессе эксплуатации. Вид и габаритные размеры трехслойных сотовых образцов регламентируются требованиями, указанными в ГОСТ 33496–2015 «Испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом» и ГОСТ Р 56809–2015 «Определение предела прочности на сжатие параллельно плоскости «сэндвич»-конструкций». Образцы выполнены длиной  $150 \pm 0,25$  мм, шириной  $100 \pm 0,25$  мм, толщиной  $12,8 \pm 0,25$  мм, обшивки в них имеют квазиизотропную схему армирования  $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_8[0^\circ/0^\circ]_2$ . Сотовый наполнитель уложен таким образом, что клеевые полосы параллельны направлению основы тканого наполнителя в обшивках. Анализ работ [3–8, 31–37] показывает, что наиболее распространенные и информативные повреждения в результате ударного воздействия – вмятины и пробоины. В монолитных конструкциях вмятина сопровождается наличием сколов, забоин и расслоением по толщине конструкции. В трехслойных сотовых конструкциях вмятина сопровождается помимо вышесказанного повреждением сотового заполнителя и его отслоением от обшивки. Пробоина в монолитных и трехслойных сотовых конструкциях включает все вышесказанное, а также частичное разрушение армирующего волокна. В трехслойных сотовых конструкциях пробоина сопровождается повреждением верхней обшивки и сотового заполнителя. С учетом вышеизложенного подобрана энергия удара, соответствующая для монолитных и трехслойных сотовых образцов дефектам типа вмятина и пробоина:

Вид дефекта	Вид образца	Энергия удара, Дж
Вмятина	Монолитный	14,5 ( $0,5E_a^*$ )
	Трехслойный сотовый	7,5 ( $E_a$ )
Пробоина	Монолитный	39,0 ( $1,25E_a$ )
	Трехслойный сотовый	15 ( $2E_a$ )

\*  $E_a$  – энергия, поглощенная образцом в процессе удара (ГОСТ 33496–2015).

Путем ударного воздействия свободно падающим грузом нанесены искусственные повреждения на монолитные и трехслойные сотовые образцы по ГОСТ 33496–2015 (рис. 2).

По результатам эхо-импульсного контроля монолитных образцов установлено (рис. 3, а), что энергия удара 14,5 Дж вызывает повреждение поверхности площадью  $S=1142$  мм<sup>2</sup>, а при 39,0 Дж –  $S=5430$  мм<sup>2</sup>. По результатам импедансного контроля трехслойных сотовых образцов установлено (рис. 3, б), что энергия удара 7,5 Дж вызывает повреждение их поверхности площадью  $S=572$  мм<sup>2</sup>, а при 15,0 Дж –  $S=961$  мм<sup>2</sup>.

После определения границ повреждения в образцах и с учетом отечественного и зарубежного опыта проведен их ремонт препреговым способом при повышенной температуре методом вакуумного формования, с использованием материалов, аналогичных материалам для исходных образцов. Схемы ремонта монолитных и трехслойных сотовых образцов представлены на рис. 4 и 5. Зону повреждения образцов по периметру обрабатывали со скосом. С учетом результатов, полученных при анализе научно-технической литературы [35–37], и габаритных размеров ремонтируемых образцов угол скоса для монолитных образцов выбран 22 градуса по периметру зоны разрушения (рис. 6, а), а для трехслойных сотовых образцов 3 градуса (рис. 6, б). Формирование скоса в зоне ремонта проводили на фрезерном станке с ЧПУ. Толщина ремонтных

накладок из ПКМ составляла для монолитных образцов 2 мм, а для трехслойных сотовых образцов 1 мм. Перед проведением ремонта поверхность образцов, подлежащих склеиванию с ремонтной вставкой и ремонтными накладками, зашкуривали наждачной бумагой до значения шероховатости соответствующей 6 классу шероховатости. На рис. 7 представлены отремонтированные монолитные и трехслойные сотовые образцы.

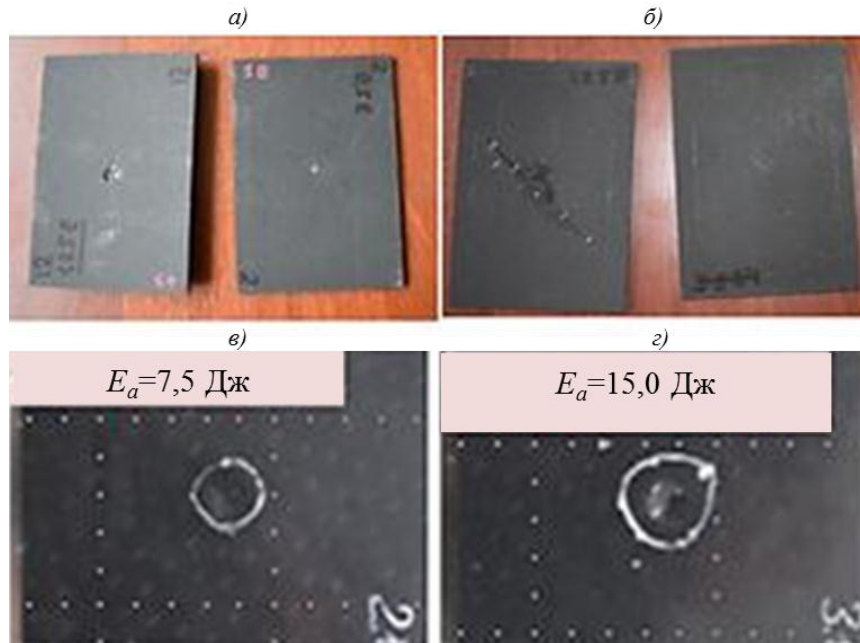


Рис. 2. Внешний вид образцов с ударным повреждением:

*a, б* – соответственно лицевая и тыльная сторона монолитных образцов (слева направо: пробоина, вмятина); *в, г* – трехслойный сотовый образец с вмятиной и пробойной соответственно ( $E_a$  – энергия удара)

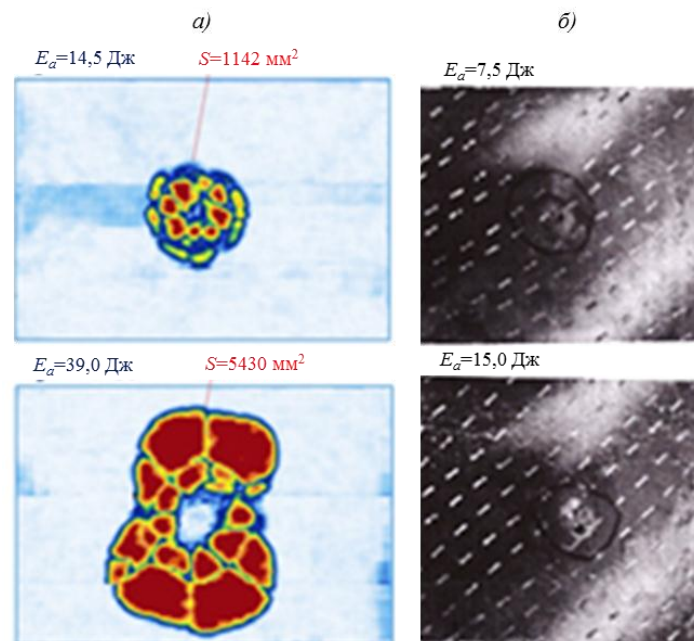


Рис. 3. Ультразвуковой контроль монолитных и трехслойных сотовых образцов после ударного воздействия:

*a* – C-сканы монолитных образцов; *б* – размеченная граница повреждений трехслойных сотовых образцов ( $E_a$  – энергия удара)

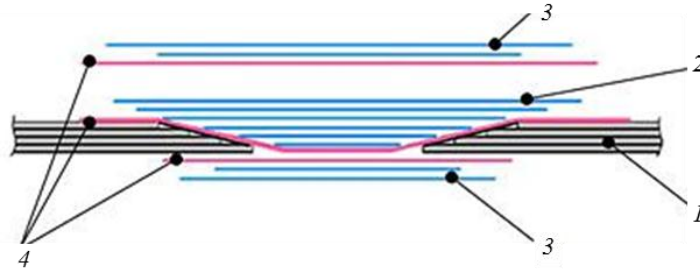


Рис. 4. Схема проведения ремонта монолитных образцов:

1 – ремонтируемая конструкция; 2 – слои клеевого препрега, формирующие ремонтную заплату; 3 – слои клеевого препрега, формирующие ремонтную накладку; 4 – клеевая пленка

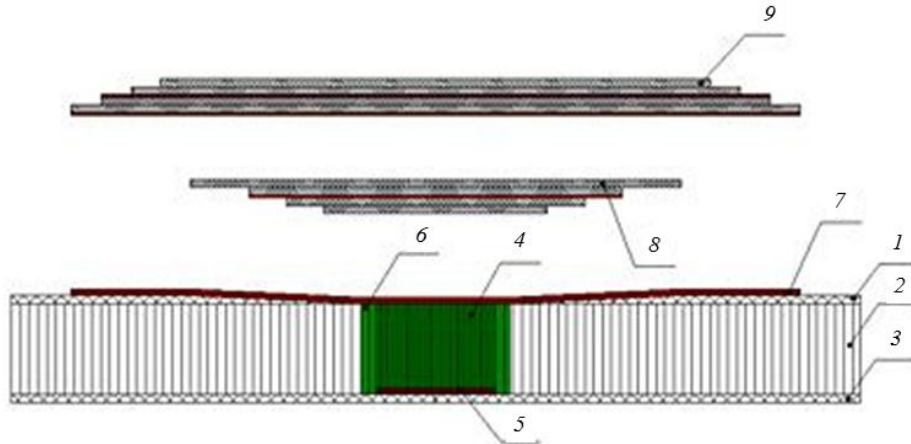


Рис. 5. Схема проведения ремонта трехслойных сотовых образцов:

1 – ремонтируемая верхняя обшивка; 2 – сотовый наполнитель; 3 – нижняя обшивка; 4 – ремонтная вставка сотового наполнителя; 5 – два слоя клеевого препрега марки КМКС; 6 – полимерная паста – синтактик; 7 – клеевая пленка; 8 – слои клеевого препрега, формирующие заплату; 9 – слои клеевого препрега, формирующие накладку

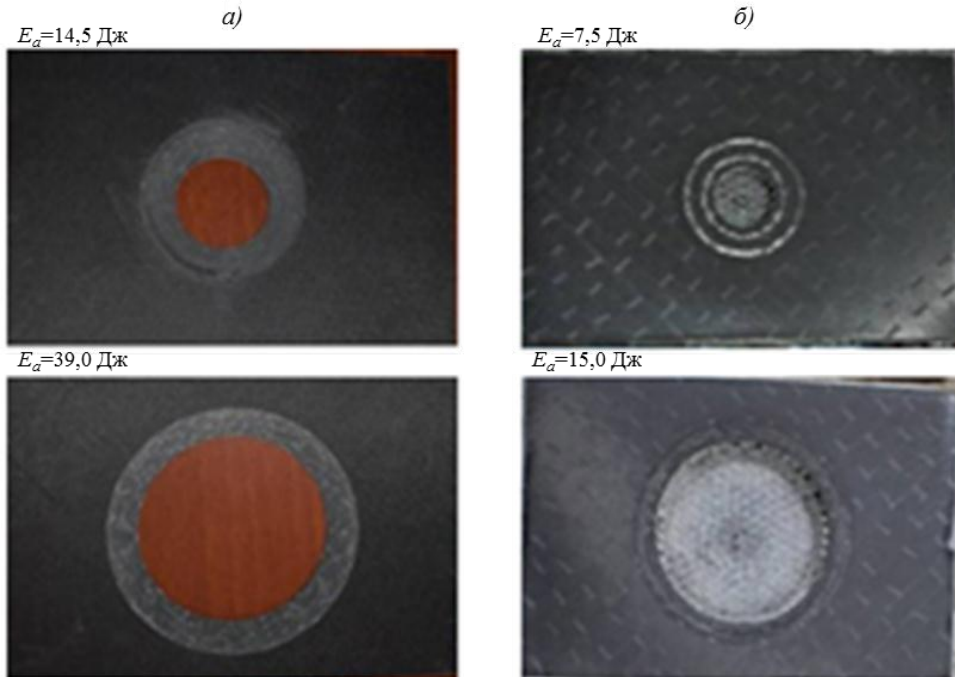


Рис. 6. Вид монолитных (а) и трехслойных сотовых образцов (б) с подготовленной зоной ремонта ( $E_a$  – энергия удара)

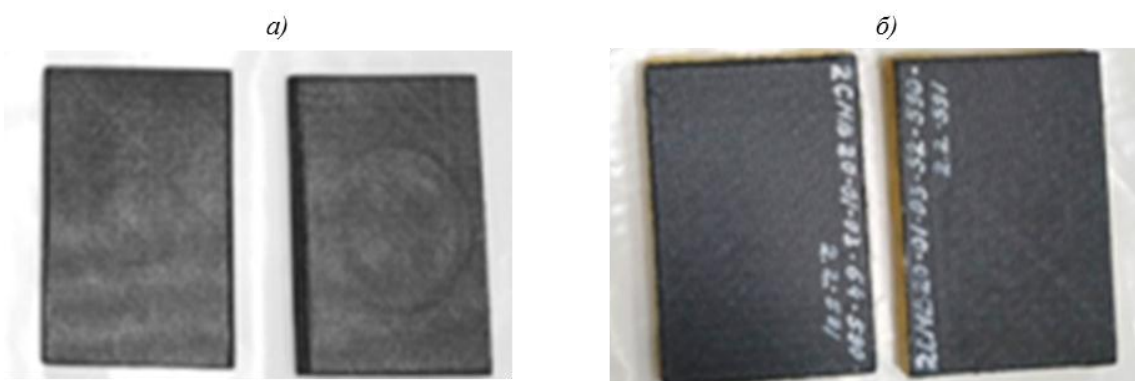


Рис. 7. Вид монолитных (а) и трехслойных сотовых образцов (б) после ремонта (слева направо: вмятина, пробоина)

Для проведения климатических испытаний исходные, подвергнутые удару и отремонтированные монолитные и трехслойные сотовые образцы выставлены на натурные климатические испытания в условиях умеренного теплого климата (рис. 8).



Рис. 8. Стенд с образцами в условиях умеренного теплого климата

Для сравнительной оценки состояния монолитных и трехслойных сотовых образцов в работе использовали следующие методы:

- механические испытания на сжатие после удара (ГОСТ 33495–2015);
- механические испытания на сжатие (ГОСТ 25.602–80);
- испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом (ГОСТ 33496–2015);
- ультразвуковые исследования монолитных образцов из ПКМ (ТР1.2.2215–2011);
- ультразвуковые исследования трехслойных сотовых образцов (ПИ1.2.841–2016);
- измерение характеристик влагонасыщения (СТО1-595-591-483–2015).

### Результаты и обсуждение

На рис. 9 представлены результаты влияния натуральных климатических испытаний на предел прочности при сжатии и наибольшую нагрузку, предшествующую разрушению образца. Видно, что предел прочности при сжатии экспонированных образцов снижается на 44%, а наибольшая нагрузка, предшествующая его разрушению снижается на 22% по отношению к значениям в исходном состоянии.

На рис. 10 представлены результаты влияния энергии удара на прочность при сжатии углепластика ВКУ-30К.Р14535. Испытания проводились при повышенной температуре (150°C). Видно, что после ударного воздействия с энергией 14,5 Дж предел прочности при сжатии монолитных образцов снизился на 49% от значения

в исходном состоянии, а после воздействия с энергией 39,0 Дж – на 65%. Следует также отметить, что после экспозиции в течение 3 мес в условиях умеренного теплого климата предел прочности при сжатии монолитных образцов снизился на 60 и 69% от исходных значений соответственно.

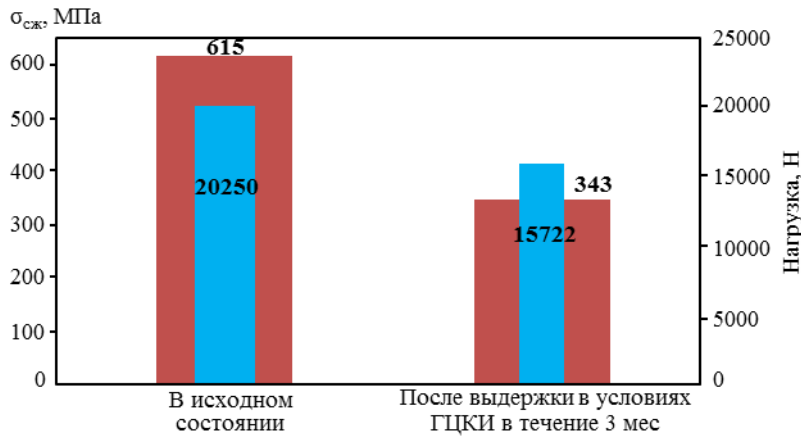


Рис. 9. Диаграмма влияния природных климатических испытаний на предел прочности при сжатии (■) и наибольшую нагрузку (■), предшествующую разрушению образца по ГОСТ 25.602–80, при температуре 150°С

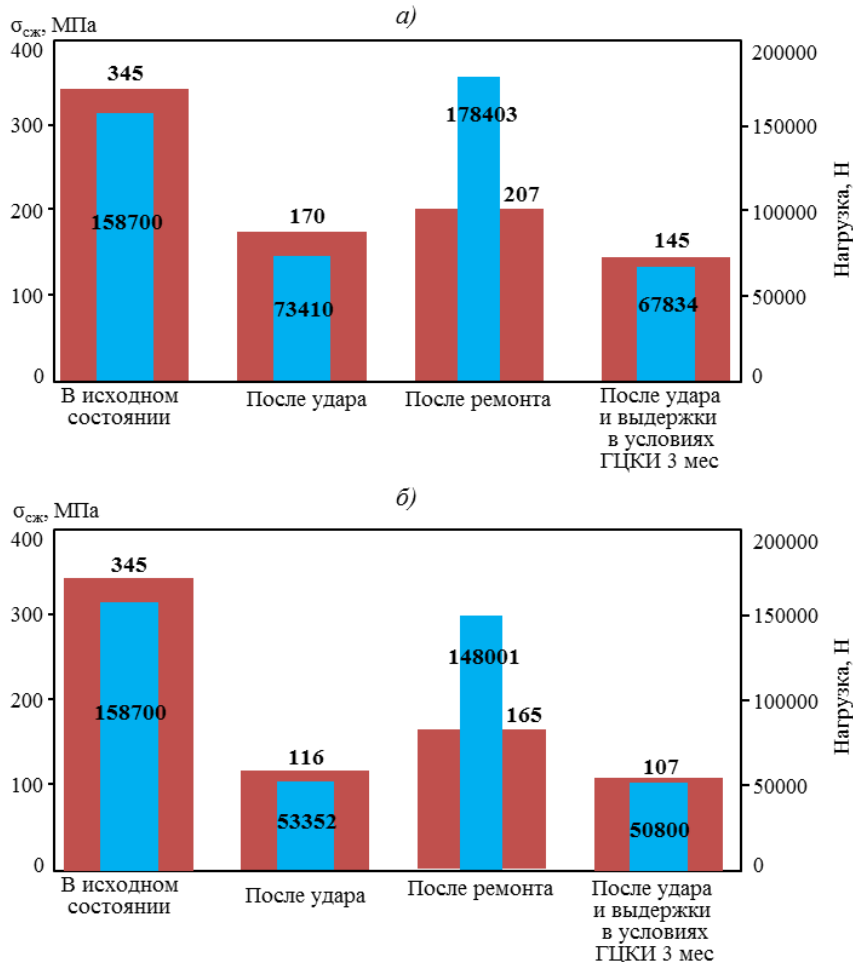


Рис. 10. Диаграмма предела прочности при сжатии (при температуре 150°С) образцов (■) и наибольшей нагрузки (■), предшествующей их разрушению по ГОСТ 33495–2015, при энергии удара 14,5 (а) и 39,0 Дж (б)

После ремонта прочность при сжатии монолитных образцов составила соответственно 207 и 165 МПа. Однако следует отметить, что монолитные образцы после ремонта представляют собой неоднородные клеесборные конструкции, поэтому следует оценивать качество проводимого ремонта не по значению предела прочности при сжатии после удара, а по их наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца. После ремонта процент сохранения наибольшей нагрузки, предшествующей разрушению образца, составил от исходного значения 112 и 93% соответственно.

Для исследования влияния энергии удара на влагонасыщение проведено моделирование влагопереноса в ПКМ с использованием варианта одномерного закона Фика с постоянными граничными условиями, аналогично моделированию, проведенному в работе [26].

На рис. 11 представлен пример графического представления кинетики сорбции и десорбции влаги в монолитных и трехслойных сотовых образцах после 3 мес климатических испытаний в условиях умеренного теплого климата на стадиях предварительной сушки, увлажнения при относительной влажности  $96 \pm 2\%$  и последующей сушки при температуре  $60^\circ\text{C}$ .

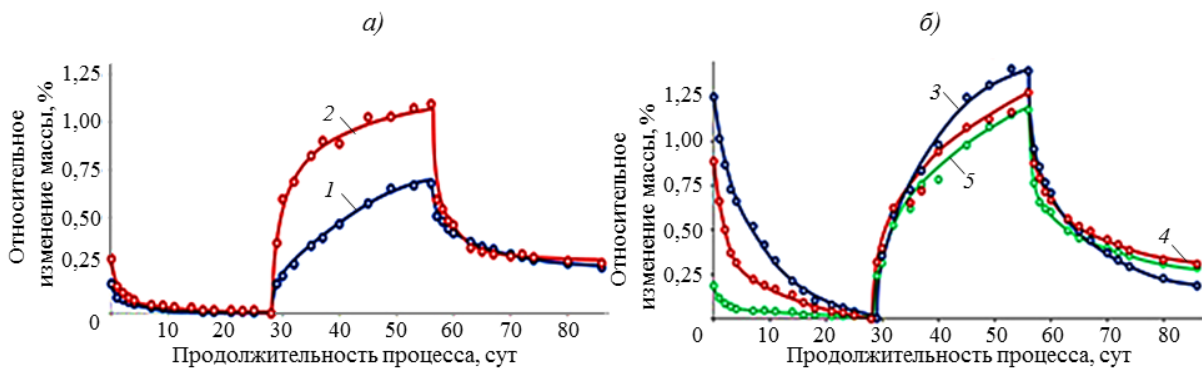


Рис. 11. Кинетика сорбции и десорбции влаги на стадиях предварительной сушки, увлажнения и последующей сушки монолитных (а) и трехслойных сотовых образцов (б); точки – экспериментальные значения; кривые – модель по закону Фика, аналогичная модели в работе [26]: при энергии удара  $0,5E_a$  (1);  $1,25E_a$  (2);  $E_a$  (3);  $2E_a$  (4); без удара (5)

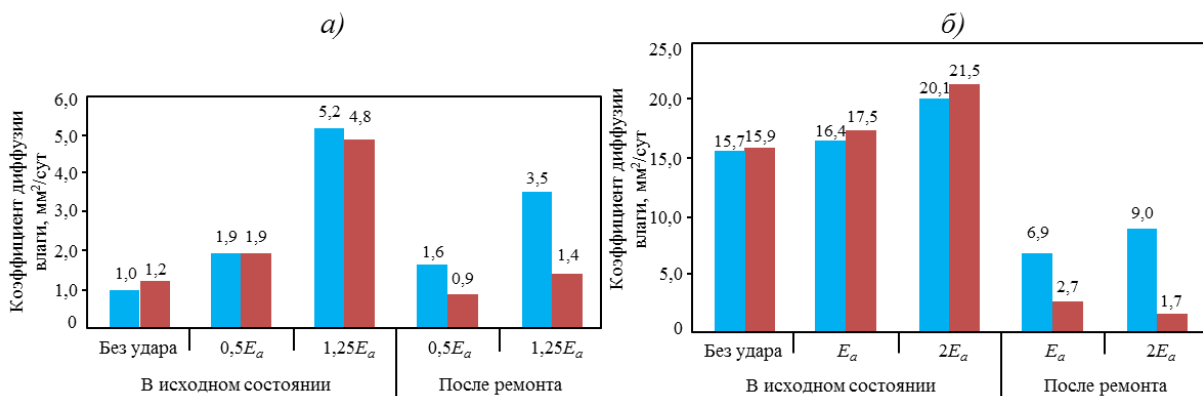


Рис. 12. Влияние энергии удара ( $E_a$ ) на коэффициент диффузии влаги монолитных (а) и трехслойных сотовых образцов (б) после выдержки в условиях умеренного теплого климата в течение 3 (■) и 6 мес (■)

Результаты измерений показателей влагопереноса (рис. 12) подтверждают общую закономерность, установленную в работах [16–18, 25]: с увеличением энергии

механического удара возрастает коэффициент диффузии влаги в ПКМ. В частности, этот показатель возрастает в 2 раза в монолитных образцах размером 150×100 мм после ударных повреждений с энергией 14,5 Дж. При более высокой энергии удара (39,0 Дж) этот показатель возрастает в 5 раз.

### Заключения

1. Экспериментально обоснована выбранная технология ремонта монолитных и трехслойных сотовых образцов после калиброванных ударных повреждений.

2. Изучено влияние энергии удара на прочностные показатели и характеристики влагопереноса монолитных образцов в поврежденном состоянии и после ремонта. Коэффициент диффузии влаги монолитных образцов после ремонта снижается на 16% при энергии удара  $0,5E_a$  и на 33% при энергии удара  $1,25E_a$  – по сравнению с исходным состоянием (с ударным повреждением) после 3 мес натурной экспозиции, и снижается на 52% при энергии удара  $0,5E_a$  и на 71% при энергии удара  $1,25E_a$  – по сравнению с исходным состоянием (с ударным повреждением) после 6 мес натурной экспозиции в условиях умеренного теплого климата.

3. Изучено влияние энергии удара на трехслойные сотовые образцы на характеристики влагопереноса в поврежденном состоянии и после ремонта. Коэффициенты диффузии влаги трехслойных сотовых образцов после ремонта снижаются на 57% при энергии удара  $E_a$  и на 55% при энергии удара  $2E_a$  – по сравнению с исходным состоянием (с ударным повреждением) после 3 мес натурной экспозиции, и снижаются на 84% при энергии удара  $E_a$  и 92% при энергии удара  $2E_a$  – по сравнению с исходным состоянием (с ударным повреждением) после 6 мес натурной экспозиции в условиях умеренного теплого климата.

4. Показано, что климатическое воздействие в условиях умеренного теплого климата продолжительностью 3 мес оказывает дополнительное влияния на снижение прочностных показателей в исходном и поврежденном состоянии исследованных образцов. Показано, что климатическое воздействие в условиях умеренного теплого климата продолжительностью 3 и 6 мес оказывает дополнительное влияния на увеличение показателей влагопереноса в поврежденном состоянии и уменьшение их после ремонта.

5. Полученные результаты характеристик влагопереноса могут быть использованы для оценки ремонтпригодности изделий из углепластика и ПКМ в целом.

Исследования в данном направлении будут продолжены. Полученные результаты могут быть рекомендованы для восстановления эксплуатационной надежности конструкций из ПКМ для АТ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-18029.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
2. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. №2. С. 37–42.
3. MIL-HDBK-336-2. Military Handbook for Military Aircraft Nonnuclear Survivability. Washington, DC: Department of Defense, 1983. 505 p.
4. Стюарт Д. Руководство по композитам для авиакосмической промышленности. URL: <https://www.twirpx.com/file/2019248/> (дата обращения: 28.06.2019).
5. DOT/FAA/AR-TN06/57. Best Practice in Adhesive-Bonded Structures and Repairs. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2007. 58 p.

6. DOT/FAA/AR-08/54. Guidelines for the Development of a Critical Composite Maintenance and Repair Issues Awareness Course. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2009. 240 p.
7. DOT/FAA/AR-00/47. Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2001. 119 p.
8. DOT/FAA/AR-03/74. Bonded Repair of Aircraft Composite Sandwich Structures. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2004. 121 p.
9. Singh N.K., Rawat P., Singh K.K. Impact response of quasi-isotropic asymmetric carbon fabric/epoxy laminate infused with MWCNTs // *Journal of Material Science*. 2016. Vol. 2016. Article ID 7541468.
10. ASTM Standard D7137. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. ASTM International, 2012. 16 p.
11. Berketis K., Tzetzis D. The compression-after-impact strength of woven and non-crimp fabric reinforced composites subjected to long-term water immersion ageing // *Journal of Material Science*. 2010. Vol. 45. No. 20. P. 5611–5623.
12. Park H., Kong C. A study on low velocity impact damage evaluation and repair technique of small aircraft composite structure // *Composites. Part A*. 2011. Vol. 42. No. 9. P. 1179–1188.
13. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. 1. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. №11. С. 19–26.
14. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // *Авиационная промышленность*. 2009. №4. С. 36–46.
15. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
16. Старцев В.О., Панин С.В., Старцев О.В. Сорбция и диффузия влаги в полимерных композитных материалах с ударными повреждениями // *Механика композитных материалов*. 2015. Т. 51. №6. С. 1081–1094.
17. Старцев В.О., Махоньков А.Ю., Котова Е.А. Механические свойства и влагостойкость ПКМ с повреждениями // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S1 (38). С. 49–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-49-55.
18. Старцев В.О., Махоньков А.Ю., Панин С.В., Старцев О.В. и др. Разрушение при сжатии и влагоперенос в полимерных композиционных материалах с механическими повреждениями // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. №7. С. 2–81.
19. Gomez-del Rio T., Zaera R., Barbero E., Navarro C. Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature // *Composites. Part B*. 2005. Vol. 36. No. 1. P. 41–50.
20. Perez A., Gil L., Oller S. Non-destructive testing evaluation of low velocity impact damage in carbon fiber-reinforced laminated composites // *Ultragarsas (Ultrasound)*. 2011. Vol. 66 (2). P. 21–27.
21. Imielinska K., Guillaumat L. The effect of water immersion ageing on low-velocity impact behaviour of woven aramid-glass fibre/epoxy composites // *Composites Science and Technology*. 2004. Vol. 64. No. 13–14. P. 2271–2278.
22. Saito H., Kimpara I. Damage evolution behavior of CFRP laminates under post-impact fatigue with water absorption environment // *Composites Science and Technology*. 2009. Vol. 69. No 6. P. 847–855.
23. Aoki Y., Yamada K., Ishikawa T. Effect of hygrothermal condition on compression after impact strength of CFRP laminates // *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68. No. 6. P. 1376–1383.
24. Панин С.В., Старцев В.О., Курс М.Г., Варченко Е.А. Развитие методов климатических испытаний материалов для машиностроения и строительства в ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. №10. С. 50–61.
25. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно-теплом климате: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.

26. Старцев В.О., Ильичев А.В. Влияние энергии механического удара на сорбцию и диффузию влаги в полимерных композиционных материалах при варьировании размеров образцов // Механика композитных материалов. 2018. Т. 54. №2. С. 219–232.
27. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 412–423.
28. Постнов В.И., Стрельников С.В. Опыт восстановления эксплуатационной надежности авиационных конструкций из ПКМ // Ремонт, восстановление, модернизация. 2014. №4. С. 12–19.
29. 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 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
30. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
31. Виленц В.С., Андреев С.В., Дементьева Л.А. Ремонт сотовых клееных конструкций из композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. Вып.: Ремонтные технологии в авиастроении. 2002. С. 65–70.
32. Румянцев А.Ф., Гуняев Г.М., Уральский М.П. Технологические дефекты в полимерных композитах и степень их опасности для работоспособности конструкций из углепластиков // Авиационные материалы и технологии. Вып.: Ремонтные технологии в авиастроении. 2012. С. 41–53.
33. Куликов В.В., Петрова А.П. Анализ типов дефектов в клеевых соединениях авиационной техники и их ремонт // Клеи. Герметики. Технологии. 2011. №5. С. 24–27.
34. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из ПКМ и методы их выявления. Ч. 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. №4. С. 23–32.
35. Самолет Ан-124-100. Руководство по технической эксплуатации 1.4001.0000.000.000 РЭ6. URL: [http://www.aviadocs.net/RLE/An-124-100/CD1/RYE/An-124-100\\_RYE6.pdf](http://www.aviadocs.net/RLE/An-124-100/CD1/RYE/An-124-100_RYE6.pdf) (дата обращения: 28.06.2019).
36. Ил-96-300. Руководство по технической эксплуатации. URL: [http://www.aviadocs.net/RLE/IL-96-300/CD1/RTYE/IL-96-300\\_RTYE\\_kn2.pdf](http://www.aviadocs.net/RLE/IL-96-300/CD1/RTYE/IL-96-300_RTYE_kn2.pdf) (дата обращения: 28.06.2019).
37. Фролов Л.М. Войсковой ремонт авиационной техники: учеб. пособие для инженерно-технического состава ВВС. М.: Воен. изд-во, 1991. 479 с.