

Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Экспериментальные исследования влияния повышенных и высоких температур на прочностные и деформационные свойства комбинированных стеклоорганопластиков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 1. – С. 104–117. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.07

Lobanov D.S., Babushkin A.V. Experimental studies of the high temperature influence on strength and deformation properties of combined glass organoplastics. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017. No. 1. Pp. 104-117. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.07



**ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА**

**№ 1, 2017**

**PNRPU MECHANICS BULLETIN**

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.07

УДК 620.1

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕННЫХ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМБИНИРОВАННЫХ СТЕКЛООРГАНОПЛАСТИКОВ**

**Д.С. Лобанов, А.В. Бабушкин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 07 октября 2016 г.  
Принята: 08 марта 2017 г.  
Опубликована: 30 марта 2017 г.

#### *Ключевые слова:*

экспериментальная механика, композиционные материалы, стеклоорганопластик, механические свойства, методики испытаний, повышенные температуры, испытания на растяжение.

### АННОТАЦИЯ

Актуальной задачей является исследование и анализ влияния повышенных и пониженных (эксплуатационных) температур на механические свойства и механизмы разрушения композиционных материалов в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным режимам, а также установления температурных зависимостей упругих и прочностных характеристик волокнистых композитов, применяемых в ответственных конструкциях.

Исследовались механические характеристики композиционных материалов на основе комбинированной стеклоорганоткани и двух типов связующего – полиимидного (КМ-1) и эпоксидного (КМ-2).

Целью настоящей работы было исследование деградации механических характеристик композиционных материалов при повышении температуры.

Исследования проводились на универсальной электромеханической системе Instron 5882, в состав которой входит термокамера и бесконтактный видеоэкстензометр. Исследования при высокой температуре 500 °С проводились на сервогидравлической испытательной системе Instron 8850 с использованием высокотемпературной муфельной печи.

Получены результаты экспериментальных исследований влияния повышенных и высокой температур на деформационные и прочностные свойства композитов двух рецептур КМ-1 и КМ-2 при растяжении и смятии вдоль утка и вдоль основы. Проведены механические испытания на растяжение и смятие при нормальной и повышенных (100, 250 °С) температурах для КМ-1 и КМ-2. Для композита КМ-1 также проведены испытания на растяжение при высокой (500 °С) температуре. Построены диаграммы деформирования, при растяжении и при смятии в условиях повышенных температур выявлены стадии закритического деформирования, определены значения упругих коэффициентов, пределов прочности и прочности при смятии. Построены и проанализированы зависимости деградации механических свойств композитов при повышении температуры. Выявлено преимущество рецептуры КМ-2 над КМ-1 по комплексу механических характеристик, поддающихся сравнению, в диапазоне температур от 22 до 250 °С при растяжении и температуре 22 °С при смятии в направлении основы.

© ПНИПУ

© Лобанов Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: cem.lobanov@gmail.com  
Бабушкин Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: bav651@yandex.ru

Dmitry S. Lobanov – CSc in Technical Sciences, Researcher, e-mail: cem.lobanov@gmail.com  
Andrey V. Babushkin – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: bav651@yandex.ru

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE HIGH TEMPERATURE INFLUENCE ON STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF COMBINED GLASS ORGANOPLASTICS

D.S. Lobanov, A.V. Babushkin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 07 October 2016  
Accepted: 08 March 2017  
Published: 30 March 2017

#### Keywords:

experimental mechanics, composite materials, glass organoplastics, testing techniques, mechanical properties, high temperatures, tensile tests.

### ABSTRACT

The investigation of high and low temperature influence on the mechanical properties and failure mechanisms of composite materials is an important problem, as well as the determination of the temperature dependence between elastic and strength characteristics for fiber composites which are used in critical structures.

The study is focuses on combined composite materials which are based on a combined glass organofabrics with two types of matrixes (epoxy, polyimide).

The aim of the present study has been to investigate the degradation of mechanical characteristics of composite materials at higher temperatures.

The research has been carried out using a universal electromechanical system Instron 5882 which includes a thermal chamber and non-contact video extensometer. The high temperature studies at 500 °C have been conducted using the servo hydraulic test system Instron 8850 with a high temperature chamber.

The paper presents the results of the experimental studies related to the high temperature influence on the mechanical properties of composites based on glass organofabrics with two types of matrixes (epoxy, polyimide) under tension and bearing. Mechanical tensile and bearing tests at normal and high (100 °C, 250 °C and 500 °C) temperatures were carried out. The postcritical deformation stage has been determined. The mechanical properties (elastic modulus, strength limit and bearing strength) of the composites have been found. The stress-strain diagrams for composite specimens have been built. The temperature degradation of mechanical properties for composites has been analyzed.

© PNRPU

---

## Введение

Мировая тенденция внедрения композитов и замещения классических (металлических) конструкционных материалов композитными в последние годы приобретает массовый характер. Наибольшее распространение получили конструкционные и функциональные армированные пластики, которые широко применяются в ответственных конструкциях машиностроения, аэрокосмической и энергетической отраслях, гражданском и промышленном строительстве и т.д. Современное состояние и направления развития в области производства и применения армированных пластиков на основе стекло-, угле- и органоволокон приведены в работах [1–4]. В работах [2, 5] рассмотрены вопросы целесообразности и опыт применения перспективных полимерных композитов в конструкциях узлов и деталей авиационных силовых установок и ракетно-космической техники.

Проектирование ответственных конструкций, очевидно, связано с достоверным знанием свойств, характеристик и особенностей поведения композитов в условиях эксплуатации. В области испытаний композиционных материалов накоплен большой опыт. В работах [6–8] рассматриваются основные методы механических испытаний полимерных композитов, проведен анализ отечественной и зарубежной (ASTM) нормативной базы по основным статическим испытаниям полимерных композитов, выявлены основные преимущества и недостатки. Однако развитие материаловедения в части создания новых конструкционных композицион-

ных материалов значительно опережает процессы стандартизации в области разработки и создания научно обоснованных методов испытания композитов. В связи с чем исследователям нередко приходится самостоятельно дорабатывать, если это возможно, существующие стандартные методы испытаний композитов. Например, в работах [9, 10] предлагается использовать модифицированную оснастку для испытаний полимерных композитов, а зачастую разрабатывать собственные методики экспериментального исследования свойств композитов с проектированием и созданием соответствующей специализированной оснастки. В обзорной работе [11] рассмотрены методики испытаний тканых композитов, в работах [12, 13] предложены методики испытаний крупноячеистых композитов с наполнителем, в [14–16] предложена методика испытаний высоконаполненных однонаправленных композитов в части использования специальных захватных частей.

При этом актуальными задачами являются разработка методик экспериментальных исследований и комплексные исследования механического поведения композитов в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным режимам. Так, в работе [17] рассматриваются вопросы деградации механических свойств авиационных композитов после вымачивания в эксплуатационных средах, в работах [18, 19] приведены результаты исследований свойств композитов после воздействия температур. В работах [20, 21] рассмотрены вопросы, связанные с климатической стойкостью и климатическим старением полимерных композитов. В работе [22] предлагается методика оценки влияния дефектов на прочность конструкций из композитов с комплексным использованием современных систем диагностики.

Актуальной задачей является исследование и анализ влияния повышенных и пониженных (эксплуатационных) температур на механические свойства и механизмы разрушения композиционных материалов и установления температурных зависимостей упругих и прочностных характеристик волокнистых композитов, применяемых в ответственных конструкциях. Экспериментальные исследования влияния эксплуатационных и климатических температур на механические свойства для разных классов полимерных композиционных материалов описаны в работах [23–27], в работах [28–31] проанализированы температурные зависимости механических свойств композитов. В работе [32] предложен микроструктурный метод прогнозирования температурной зависимости упругих свойств армированных пластиков.

Целью настоящей работы было исследование деградации механических характеристик композиционных материалов при повышении температуры. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния повышенных и высокой температур на деформационные и прочностные свойства композитов на основе стеклоорганоткани и двух типов связующего при растяжении и смятии.

## **1. Материалы, испытательное оборудование и методики испытаний**

Объектами исследований являлись текстолиты на основе стеклоорганоткани аэрокосмического назначения и двух типов связующих, которые были условно обозначены как

- КМ-1 – текстолит на основе стеклоорганоткани и полиимидного связующего СП-97К;
- КМ-2 – текстолит на основе стеклоорганоткани и эпоксидного связующего УП-2217.

Испытания на растяжение и смятие при температурах 22, 100 и 250 °С проводились на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882, оснащенной температурной камерой с рабочим диапазоном температур от –100 до +350 °С. Испытания

на растяжение при температуре 500 °С проводились на испытательной системе Instron 8850 с использованием высокотемпературной печи с рабочим диапазоном температур от +300 до +1500 °С.

Для измерения продольной деформации образцов использовался бесконтактный видеоэкстензометр, принцип работы которого основан на определении координат контрастных (белых или черных) меток измерительной базы, нанесенных на рабочую часть образца (рис. 1), при помощи цифровой видеокамеры с высоким разрешением. Использование видеоэкстензометра обусловлено тем, что он не оказывает дополнительного механического воздействия на поверхность образца в рабочей зоне, а также может использоваться совместно с термокамерой на всем температурном диапазоне без ограничений. Абсолютная погрешность измерений  $\pm 2$  мкм. Для измерения поперечных деформаций использовался навесной экстензометр Epsilon 3575-250M-NT2 с максимально возможным отклонением от измеряемой величины 0,2 % (рис. 1, а). В высокотемпературной печи при испытаниях с температурой 500 °С экстензометры не использовались, продольные деформации определялись по встроенному датчику перемещений нагружающей системы с учетом жесткости.

Испытания на растяжение проводились с учетом рекомендаций ГОСТ 25.601-80 в части выбора формы и геометрии образцов, термостатирования при повышенных температурах, скорости нагружения, статистической обработки результатов. При использовании данной методики были учтены ошибки стандарта, приведенные в работе [6]. При расчетах коэффициента Пуассона был учтен знак «-»; при расчетах разрушающего напряжения задавали разрушающую нагрузку в  $H$  и, соответственно, не учитывали лишний множитель  $10^{-3}$ ; при расчете модуля упругости задавали значение в  $H$ . Образцы имели форму двухсторонней лопатки с общими размерами  $235 \times 25 \times 3$  мм, длиной рабочей части 70 мм и шириной 18 мм, радиусами перехода  $\geq 80$  мм. Метки для измерения деформации с помощью видеоэкстензометра в рабочей части образцов были нанесены на базе 70 мм (см. рис. 1, а). Предел прочности определялся как отношение максимальной нагрузки к площади поперечного сечения рабочей части образца. Модуль упругости – отношение напряжения к соответствующей относительной деформации при нагружении материала в пределах участка по деформации от 0,1 до 0,3 %.

Испытания на смятие проводились с учетом рекомендаций отраслевых методик (ОСТ 92-1475-78 способ А), адаптированных под современное испытательное и измерительное оборудование. Статистическая обработка проводилась аналогично испытаниям на растяжение. Метод испытания основан на определении разрушающего напряжения при смятии композита под цилиндрическим стержнем (валиком), имитирующим элемент крепления (заклепку, болт или шпильку):

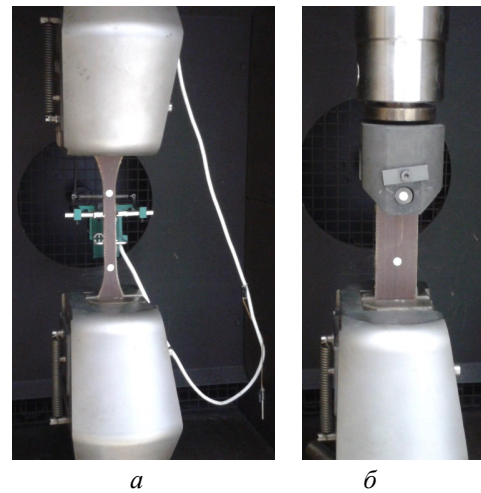


Рис. 1. Образцы с нанесенными белыми метками на растяжение (а) и смятие (б), установленные в захватах испытательных систем

Fig. 1. Samples with white spots, (a) is for tension and (b) is for bending, the samples have been fixed in the grasps of the testing systems

$$\sigma_{\text{см}} = P/d \cdot S, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр сминающего валика;  $S$  – толщина образца.

Образцы имели форму полоски с отверстием  $\varnothing = 12$  мм и внешними размерами  $150 \times 30 \times 3$  мм. При измерении относительного перемещения при смятии с помощью видеоэкстензометра одна из меток наносилась по геометрическому центру образца, вторая – на сминающий валик оснастки (см. рис. 1, б), для данной характеристики в работе принято обозначение  $\epsilon'$ . Расстояние между метками измерительной базы составляло около 50 мм.

Скорость перемещения траверсы при испытаниях на растяжение 5 мм/мин, при смятии – 10 мм/мин. При повышенных температурах 100 и 250 °C образцы композитов были предварительно термостатированы. Режим термостатирования включал в себя линейный нагрев образцов до выбранной температуры со скоростью 10 °C/мин и выдержку из расчета 20 минут на миллиметр толщины. Испытания при 500 °C проводились без термостатирования. Нагрев до температуры 500 °C осуществлялся со скоростью 25 °C/мин, а при достижении 500 °C сразу проводилось механическое нагружение образца. Подобное решение связано с тем, что температуры, близкие к 500 °C, не являются рабочими для подразумеваемых изделий, могут достигаться только в аварийном, кратковременном, пиковом режиме.

## 2. Результаты испытаний на растяжение

Испытания на одноосное растяжение для композиционных материалов КМ-1 и КМ-2 проведены при температурах 22 и 250 °C вдоль основы и при 22, 100 и 500 °C вдоль утка. Для каждого материала испытано по пять образцов в каждом направлении и на каждую температурную точку. По результатам испытаний образцов композиционных материалов КМ-1 и КМ-2 определялись максимальная нагрузка  $N_{\text{max}}$  (кН), предел прочности  $\sigma_b$  (МПа), модуль упругости  $E$  (ГПа) и коэффициент Пуассона  $\mu$ .

Результаты испытаний на растяжение представлены в табл. 1. Анализ результатов позволяет сделать некоторые промежуточные выводы. Так, для материала КМ-1 при растяжении вдоль утка можно построить температурные зависимости механических характеристик (рис. 2).

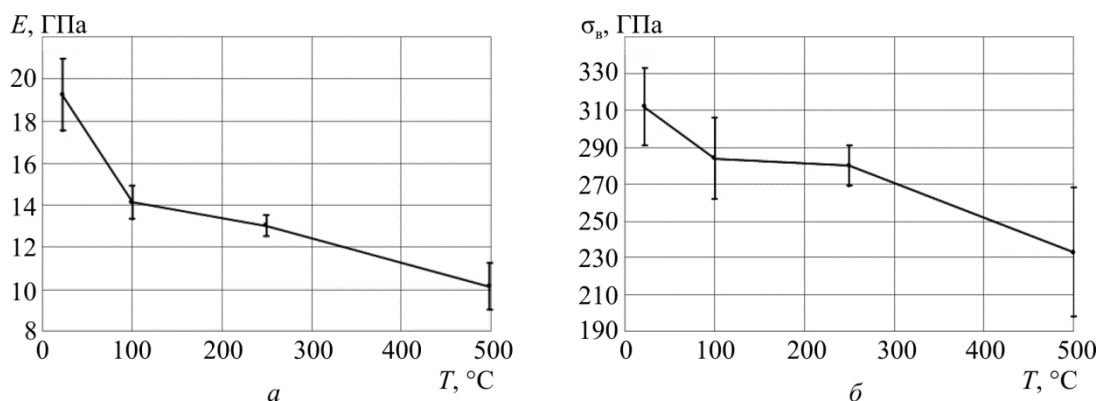


Рис. 2. Изменение модуля упругости (а) и предела временного сопротивления (б) композиционного материала КМ-1 при увеличении температуры  
Fig. 2. Alteration of the elastic modulus (a) and ultimate strength (b) of the KM-1 composite material at an increased temperature

Таблица 1

Средние значения механических характеристик композитов при растяжении в диапазоне температур от 22 до 500 °С

Table 1

Average values of composite mechanical characteristics under tension under the temperatures of 22 – 500 °С

Характеристика	Направление	Материал		Температура, °С
		КМ-1	КМ-2	
E, ГПа	Основа	21,7 ± 1,5	32,1 ± 2,4	22
	Уток	19,2 ± 1,7	21,1 ± 1,2	
	Основа	–	–	100
	Уток	14,1 ± 0,8	–	
	Основа	7,6 ± 0,2	6,0 ± 0,5	250
	Уток	13,0 ± 0,5	–	
	Основа	–	–	500
	Уток	10,1 ± 1,1	–	
$\sigma_b$ , МПа	Основа	425 ± 43	653 ± 20	22
	Уток	312 ± 21	487 ± 18	
	Основа	–	–	100
	Уток	284 ± 22	–	
	Основа	209 ± 17	288 ± 37	250
	Уток	280 ± 11	–	
	Основа	–	–	500
	Уток	233 ± 35	–	
$\mu$	Основа	0,16 ± 0,03	0,13 ± 0,03	22
	Уток	0,09 ± 0,03	0,11 ± 0,02	
	Основа	–	–	100
	Уток	0,09 ± 0,03	–	
	Основа	0,21 ± 0,05	0,23 ± 0,02	200
	Уток	0,17 ± 0,03	–	

Зависимости изменения модуля упругости и предела временного сопротивления композиционного материала КМ-1 при увеличении температуры качественно однотипны. Данные зависимости можно охарактеризовать следующими тенденциями: в диапазоне от комнатной температуры до 100 °С – существенное падение свойств, а далее падение величин характеристик продолжается, но уже с меньшей скоростью. В диапазоне от 100 до 250 °С можно констатировать наличие относительно стабильного участка. В целом для данного материала характерно снижение модуля упругости при увеличении температуры от комнатной 22 до 500 °С примерно в два раза с  $E(22\text{ °С}) = 19,2$  ГПа до  $E(500\text{ °С}) = 10,1$  ГПа. Снижение предела прочности в том же диапазоне температур составляет примерно 25 % – с 312 до 233 МПа.

Иначе себя ведет коэффициент Пуассона: сначала – в диапазоне от 22 до 100 °С значение коэффициента стабильно и составляет 0,09 единиц, при дальнейшем увеличении температуры происходит резкое повышение коэффициента Пуассона до значения 0,17 при температуре 200 °С (см. табл. 1).

По результатам испытаний образцов композита КМ-2 графические изображения температурных зависимостей не имеют смысла, так как испытания проводились при двух температурах, однако некоторые заключения сделать можно.

При повышении температуры модуль упругости  $E$  уменьшается с 32,1 до 6,0 ГПа, что составляет почти 80 %, предел прочности  $\sigma_b$  уменьшается с 653 до 288 МПа, снижение примерно 55 %. Таким образом, вследствие повышения температуры от 22 до 250 °С происходит частичная деструкция связующего и органической составляющей наполнителя, что приводит к резкому снижению механических свойств материала при растяжении вдоль основы. Противоположным образом деструкция влияет на коэффициент Пуассона, увеличивая поперечную деформацию. Коэффициент Пуассона увеличивается с  $\mu = 0,13$  до  $\mu = 0,23$  (на 56 %).

Смена направления воздействия от «вдоль основы» до «вдоль утка» при растяжении в условиях комнатной температуры приводит к следующим изменениям свойств материала КМ-2: модуль упругости изменился с 32,1 до 21,1 ГПа, т.е. на 35 %; прочность изменилась с  $\sigma_b = 653$  до  $\sigma_b = 487$  МПа (на 25 %), а коэффициент Пуассона уменьшился с  $\mu = 0,13$  до  $\mu = 0,11$  (на 15 %).

При испытаниях образцов материала КМ-2 на растяжение был обнаружен следующий эффект (рис. 3). При комнатной температуре материал проявляет «выпуклую» нелинейность. Иногда такое поведение материала трактуется как «бимодульность» [33]. А при нагреве до температуры 250 °С бимодульность качественно меняется на «вогнутую». В данном случае, в отличие от «классического» применения термина «бимодульность», подразумевается однознаковое квазилинейное поведение материала с некоторой точкой перелома. Очевидно, что это связано с изменением свойств матрицы, с увеличением ее податливости при повышении температуры и изменением условий работы арматуры. Однако подобные эффекты, как правило, не учитываются при проектировании, даже при эксплуатации конструкции в условиях повышенных температур.

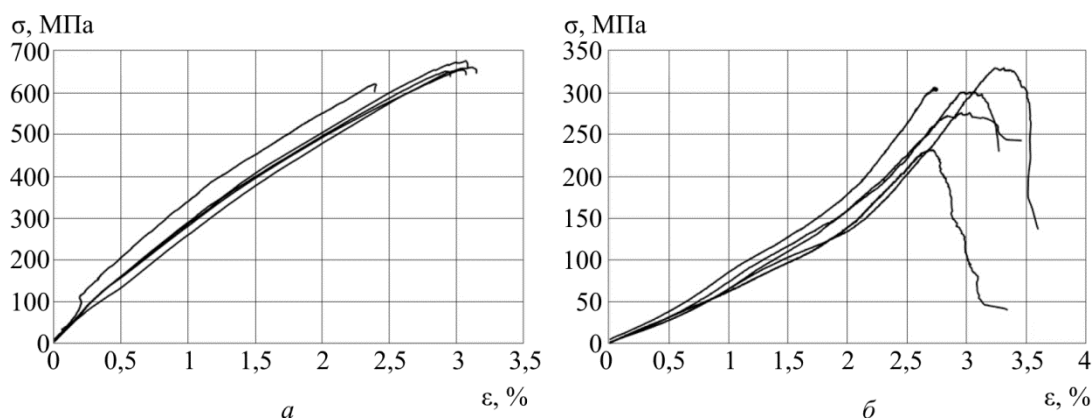


Рис. 3. Диаграммы деформирования образцов КМ-2 при растяжении вдоль основы при температуре +22 °С (а) и при температуре +250 °С (б)

Fig. 3. Deformation curves of the KM-2 samples under tension along the base, (a) is at the temperature of +22 °С and (b) is at the temperature of +250 °С

### 3. Результаты испытаний на смятие

Для материала КМ-1 проведены испытания на смятие при температуре 22 °С вдоль основы и утка и дополнительно при 100 и 250 °С вдоль утка. Для КМ-2 проведены испытания при 22 и 100 °С вдоль основы.

Результаты испытаний на смятие представлены в табл. 2, где под  $\sigma_{см}$  понимается некоторая условная величина, обозначаемая как разрушающее напряжение при смятии

Таблица 2

Средние значения механических свойств композитов при смятии  
в диапазоне температур от 22 до 250 °С

Table 2

Average values of composite mechanical properties under bending  
in the temperature range of 22–500 °С

Характеристика	Направление	Материал		Температура, °С
		КМ-1	КМ-2	
$E_{см}$ , ГПа	Основа	17,3 ± 1,8	14,2 ± 2,7	22
	Уток	12,4 ± 0,6	–	
	Основа	–	16,6 ± 2,1	100
	Уток	9,0 ± 1,4	–	
	Основа	–	–	250
	Уток	5,4 ± 0,4	–	
$\sigma_{см}$ , МПа	Основа	66 ± 4	135 ± 6	22
	Уток	67 ± 2	–	
	Основа	–	99 ± 7	100
	Уток	49 ± 1	–	
	Основа	–	–	250
	Уток	37 ± 2	–	

и определяемая по выражению (1). На рис. 4 приведены характерные диаграммы смятия образцов композиционных материалов. Сложный характер нелинейных зависимостей с учетом начального пика и ниспадающего участка целесообразно учитывать при проведении уточненных прочностных расчетов и анализа безопасности элементов композитных конструкций с учетом закритической стадии деформирования [34]. Уровень первого пика на диаграмме, соответствующий разрушению материала при смятии, принимался за величину нагрузки в момент разрушения (смятия), используемую для оценки  $\sigma_{см}$ . Также необходимо помнить, что  $\epsilon'$  (%) на диаграмме это относительное перемещение меток, одна из которых располагается на оснастке, а вторая на образце (см. рис. 1, б). Соответственно, определяемый на начальном участке диаграммы коэффициент упругости при смятии  $E_{см}$  имеет несколько иной физический смысл, нежели модуль упругости материала, определяемый при испытаниях на растяжение.

По результатам испытаний на смятие образцов материала КМ-1 можно сделать заключение, что тенденция снижения механических свойств при повышении температуры для данного материала сохраняется, как и при испытаниях на растяжение. Характеристики смятия для КМ-1 при температуре 22 °С и изменении направления воздействия с «вдоль основы» до «вдоль утка» изменяются весьма существенно – коэффициент упругости при смятии  $E_{см}$  на 30 %, прочность при смятии на 13 %.

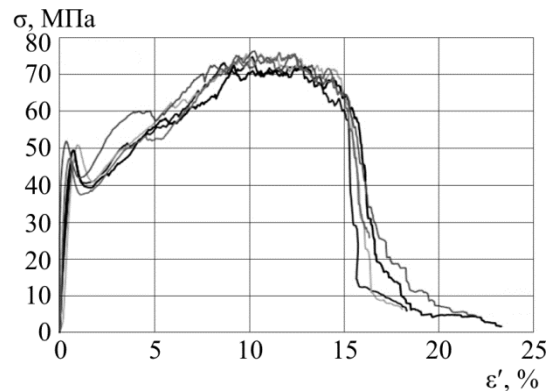


Рис. 4. Типовые диаграммы деформирования  
стеклоорганопластиков при смятии  
Fig. 4. Typical deformation curves  
of glass organoplastics under bearing



Для материала КМ-1 по результатам испытаний на смятие вдоль утка также можно представить температурные зависимости в виде графиков изменения характеристик при повышении температур от 22 до 250 °С (рис. 5).

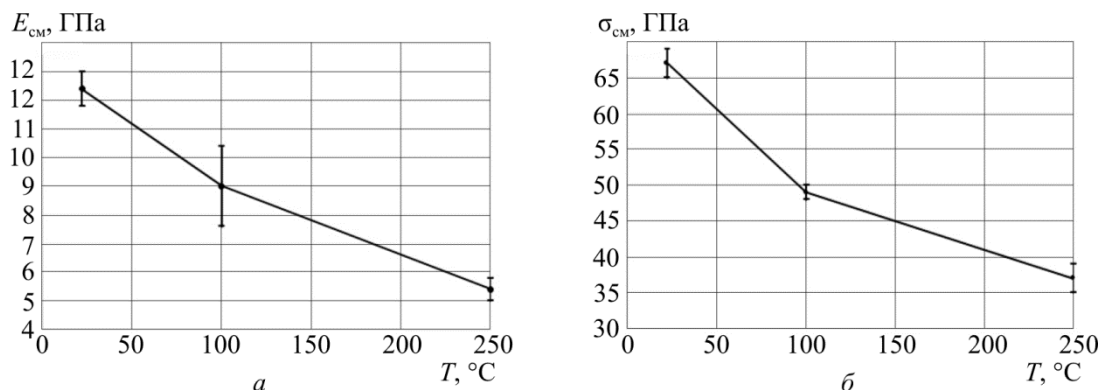


Рис. 5. Изменение коэффициента упругости при смятии (*a*) и предела прочности при смятии (*б*) композиционного материала КМ-1 при увеличении температуры  
 Fig. 5. Alteration of the elastic modulus under bearing (*a*) and ultimate strength under bearing (*b*) of the KM-1 composite material at higher temperature

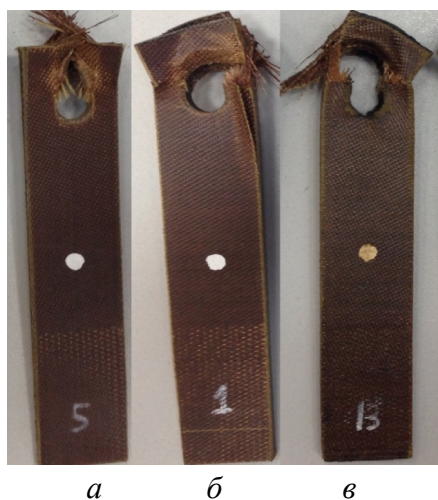


Рис. 6. Образцы КМ-1 после испытания на смятие вдоль основы (*a*) и вдоль утка (*б, в*) при температурах 22 °С (*a, б*) и 250 °С (*в*)  
 Fig. 6. The KM-1 samples after bearing tests, (*a*) is along the base, (*b, c*) are along the weft under the temperatures of 22 °С (*a, b*) and 250 °С (*c*)

Для образцов КМ-2 при испытаниях на смятие вдоль основы и изменении температуры от 22 до 100 °С установлено, что коэффициент упругости  $E_{см}$  изменяется незначительно, так, что поля статистических разбросов пересекаются, а прочность при смятии снижается на 26 %.

На рис. 6 приведены характерные виды разрушения образцов КМ-1 вдоль основы и вдоль утка.

Из рис. 6 видно, что разрушение материала в данном случае, начинаясь со смятия в зоне воздействия металлического валика, продолжается всегда путем разрыва уточных нитей армирующей системы. Воздействие температуры лишь усугубляет эту тенденцию.

## Заключение

Таким образом, получены новые данные о механических характеристиках композиционных материалов, применяемых в аэрокосмической отрасли, при испытаниях на растяжение и смятие в условиях нормальных, повышенных и высоких температур. Для материала КМ-1 построены зависимости значений упругих и прочностных характеристик при испытаниях на растяжение и смятие от повышения температуры.

Проведен анализ результатов испытаний и отмечены особенности поведения и разрушения композиционных материалов при растяжении и смятии. При испытаниях на растяжение для образцов материала КМ-2 выявлено изменение характера положительной бимодульности с «выпуклой» на «вогнутую» при повышении температуры. Следует подчеркнуть, что материал КМ-1 проявляет определенную термостойкость и работоспособен даже при кратковременном нагреве до 500 °С на воздухе.

Однако, обращая внимание на механические характеристики исследуемых композиционных материалов, поддающиеся сравнению, приведенные в табл. 1 и 2, можно констатировать, что наилучшими показателями в условиях комнатной температуры обладает материал КМ-2. При повышенных температурах (100 и 250 °С) КМ-2 также имеет более высокие характеристики по прочности, и схожие с КМ-1 по жесткости, с точностью до пересечения статистических разбросов.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00069).

### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – №5. – С. 7–17.
2. Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2011. – № 4. – С. 44–59.
3. Субботин В.В., Гринев М.А. Опыт применения материалов производства ФГУП «ВИАМ» и PORCHER в конструкциях узлов и деталей авиационных силовых установок из полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс] // *Научный электронный журнал «Новости материаловедения. Наука и техника»* – 2013. – № 5. – URL: <http://www.materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/45.pdf> (дата обращения: 22.09.2016).
4. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения [Электронный ресурс] // *Труды ВИАМ*. – 2013. – № 4. – URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/29.pdf> (дата обращения: 22.09.2016).
5. Технологии и задачи механики композиционных материалов для создания лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / А.Н Аношкин [и др.] // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2014. – № 4. – С. 5–44.
6. Адамов А.А., Лаптев М.Ю., Горшкова Е.Г. Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных материалов // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2012. – № 3. – С. 72–77.
7. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
8. Антифеева Н.В., Столянков Ю.В., Исходжанова И.В. Исследование и оценка свойств полимерных композиционных материалов по методикам, гармонизированным с международными стандартами // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2013. – №3. – С. 41–45.
9. Welsh J.S., Adams D.F. Current Status of Compression Test Methods for Composite Materials // *SAMPE Journal*. – 1997. – Vol. 33. – No. 1. – P. 35–43.
10. Hussain, A.K., Adams, D.F. Experimental Evaluation of the Wyoming-Modified Two-Rail Shear Test Method for Composite Materials // *Experimental Mechanics*. – 2004. –Vol. 44. – No. 4. – P. 354–364.
11. Dixit A., Harlal Singh Mali. Modeling techniques for predicting the mechanical properties of woven-fabric textile composites: a Review // *Mechanics of Composite Materials*. – 2013. – Vol. 49. – No. 1. – P. 1–20.

12. Халиулин В.И., Двоглазов И.В., Ковалев В.В. Методика испытаний складчатых заполнителей на поперечное сжатие // Вестн. Казан. гос. тех. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2012. – № 4–2. – С. 85–88.

13. Двоглазов И.В., Халиулин В.И. К вопросу проведения экспериментальных исследований прочности складчатых заполнителей типа z-гофра на поперечное сжатие // Вестн. Самар. гос. аэрокос. ун-та им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2012. – № 5–2 (36). – С. 275–281.

14. Research of the effectiveness of mechanical testing methods with analysis of features of destructions and temperature effects / A.V. Babushkin, D.S. Lobanov, A.V. Kozlova, I.D. Morev // *Frattura ed Integrita Strutturale*. – 2013. – Vol. 24. – P. 89–95. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.24.09

15. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Методика испытаний на одноосное растяжение однонаправленных композиционных материалов при пониженных температурах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 4. – С. 33–41.

16. Бабушкин А.В., Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С. Испытания на растяжение однонаправленного высоконаполненного стеклопластика при нормальных и повышенных температурах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т. 76, № 7. – С. 57–59.

17. Experimental research into the effect of external actions and polluting environments on the serviceability of fiber-reinforced polymer composite materials / D.S. Lobanov, V.E. Vildeman, A.D. Babin, M.A. Grinev // *Mechanics of Composite Materials*. – 2015. – Vol. 51. – No. 1. – P. 69–76.

18. Adams D. S., Herakovich C.T. Influence of damage on the thermal response of graphite-epoxy laminates // *J. Thermal Stresses*. – 1984. – Vol. 7. – No. 7. – P. 91–103.

19. Startsev O.V., Krotov A.S., Startseva L.T. Interlayer Shear Strength of Polymer Composite Materials During Long Term Climatic Ageing // *Polym. Degrad. and Stab.* – 1999. – Vol. 63. – P. 183–186.

20. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути их решения // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 412–423.

21. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги [Электронный ресурс] // *Труды ВИАМ*. – 2014. – № 7. – URL: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=688](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=688) (дата обращения: 21.09.2016).

22. Экспериментальное исследование влияния дефектов на прочность композитных панелей методами корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии / Д.С. Лобанов [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4. – С. 159–170.

23. Kucher N.K., Zarazovskii M.N., Danil'chuk E.L. Deformation and strength of laminated carbon-fiber-reinforced plastics under a static thermomechanical loading // *Mechanics of Composite Materials*. – 2013. – Vol. 48. – No. 6. – P. 669–680.

24. Трещиностойкость композитных материалов на полимерных связующих при повышенных температурах / В.В. Болотин [и др.] // *Механика композитных материалов*. – 1988. – № 5. – С. 839–844.

25. Болотин В.В., Мурзаханов Г.Х., Щугорев В.Н. Влияние повышенных температур на удельную работу межслойного разрушения композитных материалов с полимерной матрицей // *Механика композитных материалов*. – 1990. – № 6. – С. 1033–1037.

26. Димитриенко Ю.И. Разрушение композитных материалов при высоких температурах и конечных деформациях // *Механика композитных материалов*. – 1992. – № 1. – С. 43–54.

27. Кузьмин С.А., Булманис В.Н., Стручков А.С. Экспериментальное исследование прочности и деформативности намоточных стеклопластиков и органопластиков при низких климатических температурах // *Механика композитных материалов*. – 1989. – № 1. – С. 57–61.

28. Скудра А.М. Бертулис Д.Р. Зависимость упругих характеристик армированных пластиков от температуры и влаги // *Механика композитных материалов*. – 1993. – № 1. – С. 105–109.

29. Скудра А.М., Бертулис Д.Р. Зависимость упругих характеристик армированных пластиков от температуры и влаги // Механика композитных материалов. – 1993. – № 2. – С. 222–226.
30. Бабушкин А.В., Лобанов Д.С. Экспериментальное исследование и моделирование свойств композиционных материалов в условиях сложных термомеханических воздействий // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород, 2011. – № 4 (5). – С. 1984–1986.
31. Lobanov D.S., Babushkin A.V. Deformation and fracture of fibrous polymer composites in thermo-mechanical impact conditions // Proc. of ECCM15: European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 24-28 June 2012. – Paper ID: 1224.
32. Скудра А.А. Микроструктурный метод прогнозирования температурной зависимости упругих свойств армированных пластиков // Механика композитных материалов. – 1990. – № 4. – С. 594–598.
33. Шаклеина С.Е., Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А. Изменение микроструктуры и механических свойств стеклопластиковых труб после длительной эксплуатации на промышленных пульпо- и реагентопроводах // Техника машиностроения. – 2001. – № 5. – С. 68–70.
34. Вильдеман В.Э. Закономерности и модели процессов накопления повреждений, закритического деформирования и структурного разрушения композиционных материалов // Вестник Пермского государственного технического университета. Динамика и прочность машин. – 2001. – № 2. – С. 37–44.

## References

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniia razvitiia materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030] *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 7–17.
2. Zorin V.A. Opyt primeneniia kompozitsionnykh materialov v izdeliiakh aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhnike [Experience of composite application in articles of aviation, rocket and cosmic technics (review)]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov. – Composite materials constructions*, 2011, no. 4, pp. 44–59.
3. Subbotin V.V., Grinev M.A. Opyt primeneniia materialov proizvodstva FGUP «VIAM» i PORCHER v konstruktsiakh uzlov i detalei aviatsionnykh silovykh ustanovok iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Experience in the application of materials produced by FSUE "VIAM" and PORCHER in the designs of units and parts of aviation power plants made of polymer composite materials]. *Nauchnyi elektronnyi zhurnal «Novosti materialoveden'ia. Nauka i tekhnika.»- Material science and technology news*, 2013, no. 5, available at: [www.materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/45.pdf](http://www.materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/45.pdf).
4. Sokolov I.I., Raskutin A.E. Ugleplastiki i stekloplastiki novogo pokoleniia [New generation of carbon fiber reinforced plastics and glass fiber reinforced plastics]. *Trudy VIAM.- Electronic scientific journal "Proceedings of VIAM"*, 2013, No. 4 available at: [www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/29.pdf](http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/29.pdf).
5. Anoshkin A.N., Zuiko V.Yu., Shipunov G.S., Tretyakov A.A. Technologies and problems of composite materials mechanics for production of outlet guide vane for aircraft jet engine. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2014, no. 4, pp. 5–44. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.01
6. Adamov A.A., Laptev M.Iu., Gorshkova E.G. Analiz otechestvennoi i zarubezhnoi normativnoi bazy po mekhanicheskim ispytaniyam polimernykh kompozitsionnykh materialov [Analysis of the international and Russian Federation national technical standards for mechanical tests of polymeric composite materials]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov – Composite materials constructions*, 2012, no. 3, pp.72–77.
7. Tarnopol'skii Iu.M., Kintsis T.Ia. Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov [Methods of static testing of reinforced plastics]. *Moscow, Chemistry*, 1981, 272 p.
8. Antiufeeva N.V., Stoliankov Iu.V., Iskhodzhanova I.V. Issledovanie i otsenka svoistv polimernykh kompozitsionnykh materialov po metodikam, garmonizirovannym s mezhdunarodnymi standartami [Research and properties evaluation of polymeric composite materials by the techniques harmonized with the international standards]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov– Composite materials constructions*, 2013, no. 3, pp. 41–45.
9. Welsh J.S., Adams D.F. Current Status of Compression Test Methods for Composite Materials. *SAMPE Journal*, vol. 33, no. 1, January 1997, pp. 35–43.
10. Hussain, A.K., Adams, D.F. Experimental Evaluation of the Wyoming-Modified Two-Rail Shear Test Method for Composite Materials. *Experimental Mechanics*, 2004, vol. 44, no. 4, pp. 354–364.

11. Dixit A., Harlal Singh Mali. Modeling techniques for predicting the mechanical properties of woven-fabric textile composites: a Review. *Mechanics of Composite Materials*, 2013, vol. 49, no. 1, pp. 1-20.
12. Khaliulin V.I., Dvoeglazov I.V., Kovalev V.V. Metodika ispytaniy skladchatykh zapolnitelei na poperechnoe szhatie [Method for testing folded aggregates for lateral compression]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2012, no. 4-2, pp. 85-88.
13. Dvoeglazov I.V., Khaliulin V.I. K voprosu provedeniia eksperimental'nykh issledovaniy prochnosti skladchatykh zapolnitelei tipa z-gofra na poperechnoe szhatie [To the issue of carrying out experimental studies of the strength of folded aggregates of the z-groove type on transverse compression]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2012, no. 5-2 (36), pp. 275-281.
14. Babushkin A.V., Lobanov D.S., Kozlova A.V., Morev I.D. Research of the effectiveness of mechanical testing methods with analysis of features of destructions and temperature effects. *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2013, vol. 24, pp. 89-95. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.24.09
15. Lobanov D.S., Babushkin A.V. Metodika ispytaniy na odnoosnoe rastiazhenie odnonapravlennykh kompozitsionnykh materialov pri ponizhennykh temperaturakh [Technique of unidirectional composite materials at low temperatures tensile tests]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2012, no. 4, pp. 33-41.
16. Babushkin A.V., Vil'deman V.E., Lobanov D.S. Ispytaniia na rastiazhenie odnonapravlenogo vysokonapolnennogo stekloplastika pri normal'nykh i povyshennykh temperaturakh [Tensile tests of unidirectional high-grade fiberglass at normal and elevated temperatures]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2010, vol. 76, no. 7, pp. 57-59.
17. Lobanov D.S., Vildeman V.E., Babin A.D., Grinev M.A. Experimental research into the effect of external actions and polluting environments on the serviceability of fiber-reinforced polymer composite materials. *Mechanics of Composite Materials*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 69-76.
18. Adams D.S., Herakovich C.T. Influence of damage on the thermal response of graphite-epoxy laminates. *J. Thermal Stresses*, 1984, vol. 7, no. 7, pp. 91-103.
19. Startsev O.V., Krotov A.S., Startseva L.T. Interlayer Shear Strength of Polymer Composite Materials During Long Term Climatic Ageing. *Polym. Degrad. and Stab*, 1999, vol. 63, pp. 183-186.
20. Kirillov V.N., Startsev O.V., Efimov V.A. Klimaticheskaya stoikost' i povrezhdaemost' polimernykh kompozitsionnykh materialov, problemy i puti ikh resheniia [Climatic stability and damageability of polymer composite materials, problems and solutions]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 412-423.
21. Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S. Diagnostika nachal'noi stadii klimaticheskogo stareniiya PKM po izmeneniiu koeffitsienta diffuzii vlagi [Initial stage environmental degradation of the polymer matrix composites evaluated by water diffusion coefficient]. *Trudy VIAM. – Electronic scientific journal "Proceedings of VIAM"*, 2014, no. 7, available at: [www.viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=688/](http://www.viam-works.ru/ru/articles?art_id=688/)
22. Lobanov D.S., Wildemann V.E., Spaskova E. M., Chikhachev A.I. Experimental investigation of the defects influence on the composites sandwich panels strength with use digital image correlation and infrared thermography methods. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 4, pp. 159-170. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.10
23. Kucher N.K., Zarazovskii M.N., Danil'chuk E.L. Deformation and strength of laminated carbon-fiber-reinforced plastics under a static thermomechanical loading. *Mechanics of Composite Materials*, 2013, vol. 48, no. 6, pp. 669-680.
24. Bolotin V.V. Treshchinostoikost' kompozitnykh materialov na polimernykh svyazuiushchikh pri povyshennykh temperaturakh [Crack resistance of composite materials on polymeric binders at elevated temperatures]. *Mechanics of Composite Materials*, 1988, no. 5, pp. 839-844.
25. Bolotin V.V., Murzakhanov G.Kh., Shchugorev V.N. Vliianie povyshennykh temperatur na udel'nuiu rabotu mezhslainogo razrusheniia kompozitnykh materialov s polimernoii matritsei [Influence of elevated temperatures on the specific work of interlayer destruction of composite materials with a polymer matrix]. *Mechanics of Composite Materials*, 1990, no. 6, pp. 1033-1037.
26. Dimitrienko Iu.I. Razrushenie kompozitnykh materialov pri vysokikh temperaturakh i konechnykh deformatsiiakh [Failure of composite materials at high temperatures and finite strains]. *Mechanics of Composite Materials*, 1992, no. 1, pp. 43-54.
27. Kuz'min S.A., Bulmanis V.N., Struchkov A.S. Eksperimental'noe issledovanie prochnosti i deformativnosti namotochnykh stekloplastikov i organoplastikov pri nizkikh klimaticheskikh temperaturakh [Experimental investigation of the strength and deformability of wound fiberglasses and organoplastics under low climatic temperatures]. *Mechanics of Composite Materials*, 1989, no. 1, pp. 57-61.

28. Skudra A.M. Bertulis D.R. Zavisimost' uprugikh kharakteristik armirovannykh plastikov ot temperatury i vlagi [Effect of moisture and temperature on the elastic characteristics of reinforced plastics]. *Mechanics of Composite Materials*, 1993, no. 1, pp. 105-109.

29. Skudra A.M. Bertulis D.R. Zavisimost' uprugikh kharakteristik armirovannykh plastikov ot temperatury i vlagi [Effect of moisture and temperature on the elastic characteristics of reinforced plastics]. *Mechanics of Composite Materials*, 1993, no. 2, pp. 222-226.

30. Babushkin A.V., Lobanov D.S. Eksperimental'noe issledovanie i modelirovanie svoistv kompozitsionnykh materialov v usloviakh slozhnykh termomekhanicheskikh vozdeistvii [Experimental research and modeling of the properties of composite materials under conditions of complex thermomechanical effects]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. N. Novgorod, 2011, no. 4(5), pp. 1984-1986.

31. Lobanov D.S., Babushkin A.V. Deformation and fracture of fibrous polymer composites in thermo-mechanical impact conditions. *Proc. of ECCM15: European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 24-28 June 2012*, Paper ID: 1224, ISBN 978-88-88785-33-2

32. Skudra A.A. Mikrostrukturnyi metod prognozirovaniia temperaturnoi zavisimosti uprugikh svoistv armirovannykh plastikov [Microstructural method for predicting the temperature dependence of the elastic properties of reinforced plastics]. *Mechanics of Composite Materials*, 1990, no. 4, pp.594-598.

33. Sovetova Iu.V., Sidorenko Iu.N., Skripniak V.A. Mnogourovnevnyi podkhod k opredeleniiu effektivnykh svoistv kompozita s uchetom povrezhdaemosti [Multiscale approach to estimation of effective properties of a composite with regard to its damaging]. *Physical Mesomechanics*, 2013, vol. 16, no. 5, pp. 59-65.

34. Vil'deman V.E. Zakonomernosti i modeli protsessov nakopleniia povrezhdenii, zakriticheskogo deformirovaniia i strukturnogo razrusheniia kompozitsionnykh materialov [Regularities and models of processes of damage accumulation, supercritical deformation and structural destruction of composite materials]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Dinamika i prochnost' mashin*. 2001, no. 2. pp. 37-44.