

УДК 621

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

П. В. СОЛОВЬЕВ<sup>1</sup>, Н. Н. ДМИТРИЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>paulnightingale@mail.ru, <sup>2</sup>dmitriev.ikita@rambler.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 04.04.2019

**Аннотация.** Рассматривается влияние температурных циклических воздействий на прочность углепластика на основе эпоксидной смолы, модифицированной минеральным наполнителем (бентонитом). Представлено исследование структуры углепластика до и после модифицирования связующего. Результаты исследования показали, что термоциклическое воздействие на немодифицированный углепластик приводит к значительному уменьшению прочности, в то время как сохраняемость прочностных характеристик модифицированного углепластика при воздействии термоциклов существенно выше.

**Ключевые слова:** композит; модификатор; температура; время; прочность; циклические теплосмены; структура; волокно; коэффициент армирования; бентонит; матрица; микротрещины.

### ВВЕДЕНИЕ

Улучшение свойств композиционных материалов (КМ), в частности, углепластиков, является одним из путей повышения эксплуатационных характеристик изделий из них. Актуальным направлением улучшения прочностных свойств углепластика является модифицирование связующего (эпоксидной смолы) минеральными наполнителями [1].

Для модифицирования могут быть использованы различные наполнители: нанотрубки, органоглины (монтмориллонит и вермикулит) и др. [2]. В данной статье в качестве модификатора связующего выступает бентонит, содержащий около 70 % монтмориллонита. Монтмориллонит относится к алюмосиликатам. Размер частиц монтмориллонита составляет в среднем около 200 нм в длину и 1 нм в ширину. При введении органоглины в полимерную матрицу повышаются механи-

ческие свойства и термическая стабильность материалов [2].

Введение в полимерные связующие на основе полибутилентерефталата органоглин (до 2 %) приводит к изменению температуры деструкции от 371 до 390 °С [3, 4].

В работах [6] и [7] отражены технологические аспекты модифицирования композиционных материалов бентонитом и его предварительного отжига.

Повышение температуры деструкции полимерного связующего за счет введения минерального наполнителя позволяет расширить диапазон температур эксплуатации изделий из углепластика.

На основе представленного выше обзора литературных источников можно сделать вывод о том, что модифицирование связующего является одним из направлений, позволяющим повысить свойства матриц КМ и, соответственно, композитов на их основе.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Таблица 1

В качестве материала образцов выбран композит на основе ткани саржевого переплетения (КНР), соотношение количества волокон основы и утка, в которой составляет 1,2:1, и эпоксидного термоактивного связующего ЭД-20. Модифицирование матрицы производилось бентонитом. Механические характеристики компонентов:

– прочность на растяжение углеродной ткани  $\sigma_B = 4380$  МПа;

– прочность на растяжение связующего ЭД-20  $\sigma_B = 65$  МПа.

Образцы изготовлены методом ручной выкладки в пресс-форму. Все образцы изготовлены по единой технологии. Формование производилось в течение суток под прессом с усилием 0,15 МПа. Температура формования составляет 60–80 °С. Расчетный коэффициент армирования 0,6. Термоциклические испытания образцов из данного композиционного материала проводились в диапазоне температур от 50 до 150 °С. Микроструктура поверхности матрицы и изломов композита исследуется с помощью оптического и растрового электронного микроскопа.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА

Предел прочности КМ определяли на основе механических испытаний на растяжение при нормальной температуре.

Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что модифицирование матрицы бентонитом способствует сохранению прочностных характеристик композита после воздействия на него циклических теплосмен. Снижение прочности немодифицированных образцов после 100 термоциклов имело место на 28 %, а модифицированных – менее 5 %. Также из табл. 1 видно, что режим предварительного отжига бентонита влияет на прочность композита при термоциклических воздействиях.

## Прочность композитного углепластика до и после термоциклических испытаний

Немодифицированные образцы			
Количество термоциклов	$\sigma_B$	$\sigma'_B$	Ед. измерения
0	543	823	МПа
50	418	633	МПа
100	392	594	МПа
модифицированные образцы, отжиг бентонита при 110 °С			
Количество термоциклов	$\sigma_B$	$\sigma'_B$	Ед. измерения
0	250	510	МПа
50	275	561	МПа
100	330	674	МПа
Модифицированные образцы, отжиг бентонита при 800 °С			
Количество термоциклов	$\sigma_B$	$\sigma'_B$	Ед. измерения
0	633	945	МПа
50	579	864	МПа
100	629	939	МПа

где  $\sigma'_B = \frac{\sigma_B}{\psi}$  – относительная прочность композита;  $\psi$  – коэффициент армирования.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА ДО И ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛОВ

Определение размера частиц модификатора проводилось на оптическом микроскопе. Частицы бентонита в матрице после предварительного отжига при 110 °С в течение 30 минут показаны на рис. 1.

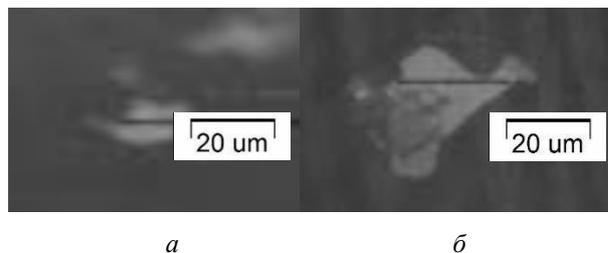


Рис. 1. Частицы бентонита в матрице: а – мелкая частица; б – крупная частица

Средний размер частиц 8,7 мкм, минимальный – 4 мкм. Размеры частиц модификатора существенно влияют на механические характеристики полученного композита: меньший размер частиц обеспечивает более высокие механические свойства [8].

Частицы бентонита в матрице после предварительного отжига при 800 °С, показаны на рис. 2 и 3.

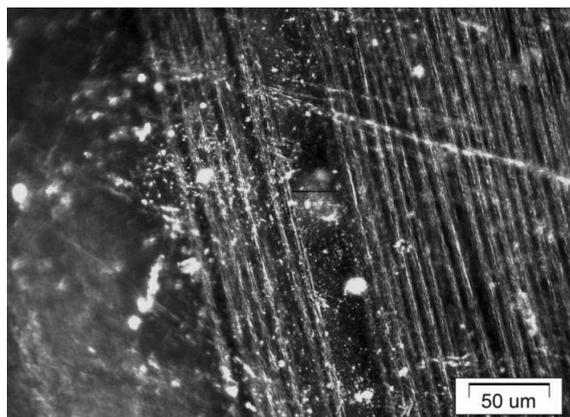


Рис. 2. Крупная частица бентонита

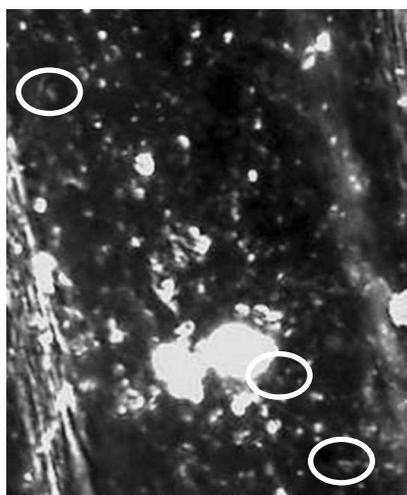


Рис. 3. Мелкие частицы бентонита

Средний размер частиц 4,84 мкм, минимальный – 1 мкм. Прочность образцов данной партии выше предыдущей, что согласуется с данными работы [8].

Оценка поверхности углепластиковых образцов до и после термоциклических испытаний осуществлялась на растровом электронном микроскопе. На поверхность образца напыляли слой платины, так как матрица является диэлектриком. Снимки получены в режиме вторичных электронов (рис. 4–9).

Немодифицированный образец (рис. 4) на поверхности имеет следы деструкции (выделено на рис.) связующего в отличие от поверхности модифицированного образца, (рис. 5).

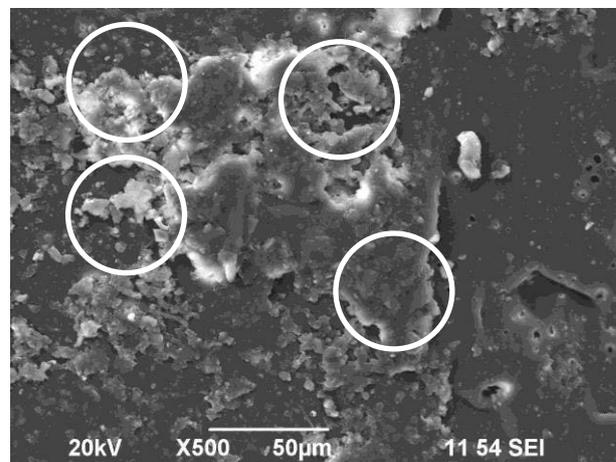


Рис. 4. Поверхность немодифицированного образца после 100 термоциклов

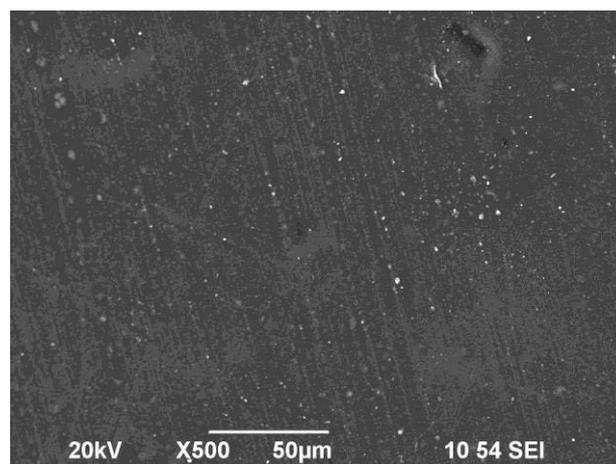
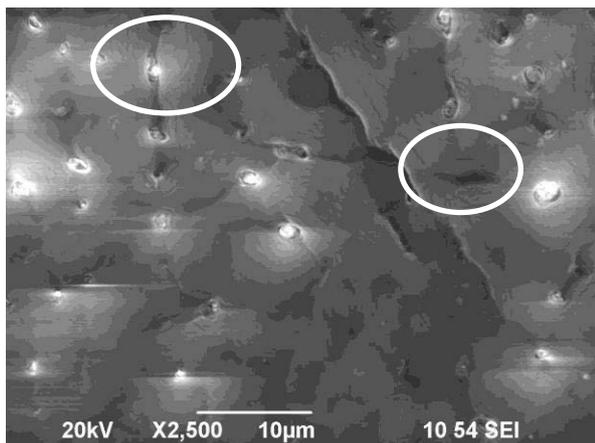


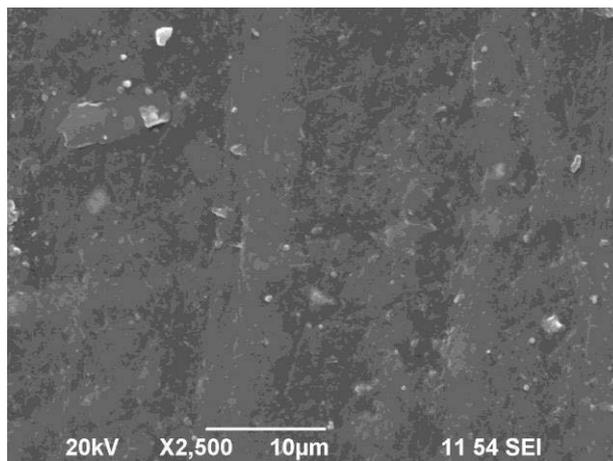
Рис. 5. Поверхность модифицированного образца после 100 термоциклов

Рис. 6 и 7 показывают, что количество поверхностных повреждений немодифицированных образцов значительно больше даже без термоциклического воздействия. Судя по всему, бентонит улучшает процесс полимеризации, уменьшая количество образующихся при этом поверхностных дефектов (трещин).

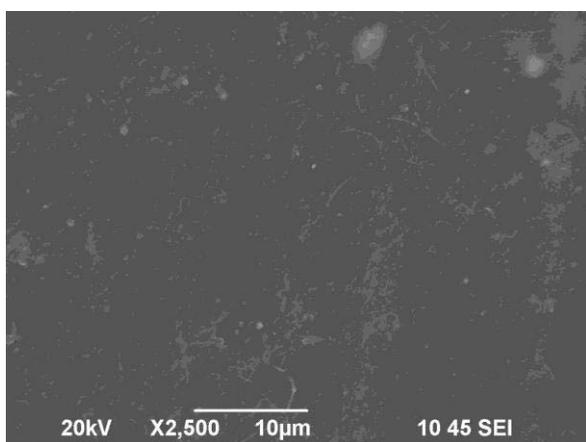
На рис. 8 (немодифицированный образец) после термоциклов в целом видно увеличение количества трещин в матрице. При этом увеличивается и протяженность трещин, происходит слияние мелких трещин в одну. На рис. 9 (модифицированный образец) такого не наблюдается.



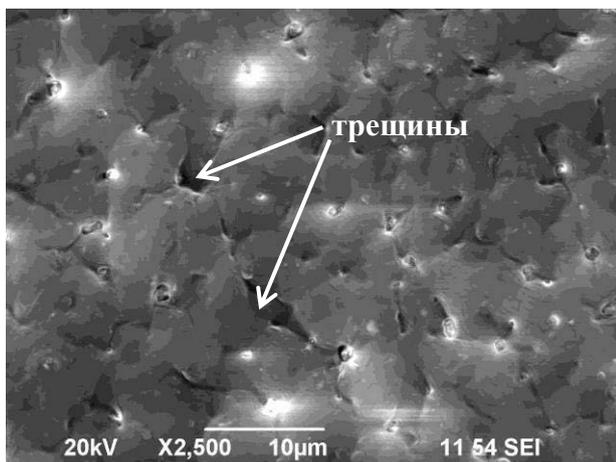
**Рис. 6.** Состояние немодифицированной матрицы до термоциклов



**Рис. 9.** Состояние модифицированной матрицы после 100 термоциклов



**Рис. 7.** Состояние модифицированной матрицы до термоциклов



**Рис. 8.** Состояние немодифицированной матрицы после 100 термоциклов

### ОЦЕНКА ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Оценка поверхности разрушения (излома) осуществлялась по анализу параметров вытаскивания волокон (длины и количества) в месте разрушения. На рис. 10 представлены отдельные образцы из каждой партии механических испытаний. На них видно, что разрушение на всех образцах происходит в рабочей области и имеет преимущественно хрупкий характер.

На рис. 11 представлены микроизломы образцов финальной партии. Снимки микроизломов других партий имеют качественно схожий характер. На основе фотографий микроизломов определили, что объемная доля волокон немодифицированных образцов равна 59 %, объемная доля волокон модифицированных образцов (отжиг 110 °С) равна 49 %, объемная доля волокон модифицированных образцов (отжиг 800 °С) равна 47 %.

На рис. 12 представлена диаграмма, которая показывает прирост прочности образцов, которые были модифицированы бентонитом, предварительно отожженным при 800 °С, что поспособствовало удалению влаги из бентонита и обеспечило его измельчение до размера частиц в 1 мкм.

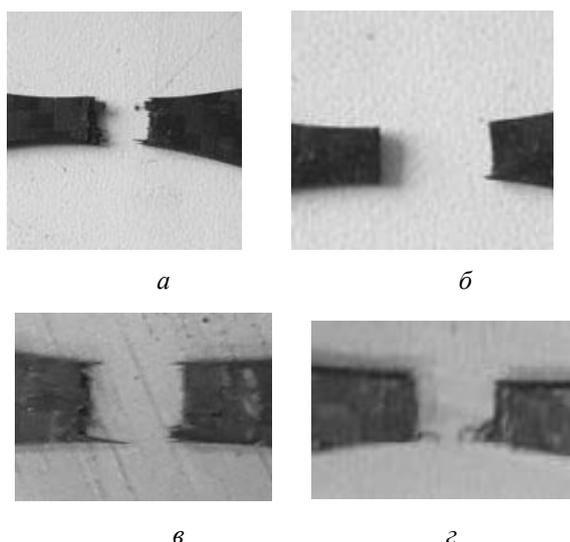


Рис. 10. Образцы после механических испытаний:

- а – немодифицированный, 0 циклов;
- б – немодифицированный, 100 циклов;
- в – модифицированный, 0 циклов;
- г – модифицированный, 100 циклов

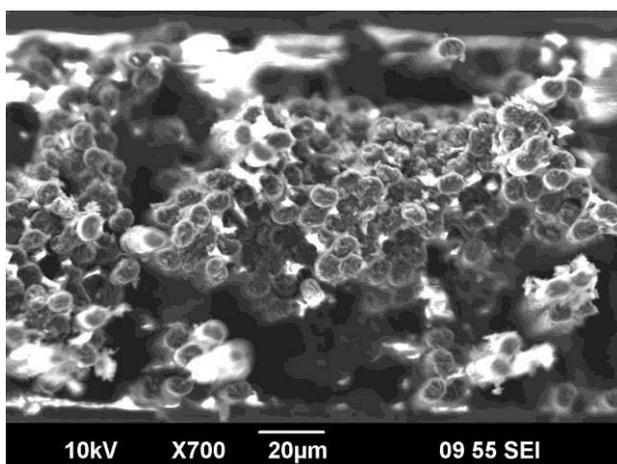


Рис. 11. Излом модифицированного 800 °С образца без термоциклов

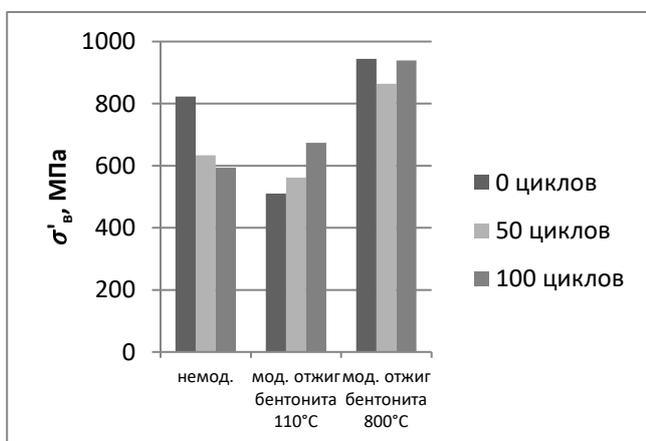


Рис. 12. Зависимость отношения предела прочности к коэффициенту армирования от состояния образцов с модификатором

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований влияния модификации углепластика с эпоксидной смолой бентонитом при воздействии циклически изменяющихся температур можно сделать следующие выводы:

- снижение прочности модифицированных образцов после термоциклических воздействий значительно меньше ( $\leq 5\%$ ) по сравнению с немодифицированными (28 %);
- за счет предварительного отжига бентонита при 800 °С увеличивается дисперсность частиц модификатора при последующем его измельчении в связующем, что приводит к повышению прочностных свойств модифицированных образцов;
- состояния поверхности обычных образцов, по сравнению с модифицированным, свидетельствуют о термической стабильности модифицированной матрицы и повышению сопротивления деструкции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гороховский А. В.** Композитные наноматериалы [Электронный ресурс]. URL: <http://pismo.netnado.ru/umot/kompozitnie-nanomateriali/> – [ А. V. Gorokhovskiy Composite nanomaterials [Online], (in Russian). Available: <http://pismo.netnado.ru/umot/kompozitnie-nanomateriali/> - an article on the Internet ]
2. **Полимерные** нанокомпозиты на основе органо-модифицированных слоистых силикатов – новый тип конструкционных материалов / М. А. Микитаев и др. // II Международная конференция. Нальчик, 2005. [ М. А. Mikitaev et. al., “Polymer nanocomposites based on organo-modified layered silicates – a new type of structural materials”, (in Russian), in II international conference, Nalchik, 2005. ]
3. **Микитаев А. К.** Нанокомпозитные полимерные материалы на основе органоглин [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nanokompozitnye-polimernye-materialy-na-osnove-organoglin> [ А. К. Mikitaev, Polymer Nanocomposite materials based on organogen [Electronic resource], (in Russian). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/nanokompozitnye-polimernye-materialy-na-osnove-organoglin> ]
4. **Структура** и деформационное поведение нанокомпозитов на основе полиэтилена низкой плотности и модифицированных глин / Е. М. Антипов и др. // Высокомолек. соед. А. 2003. Т. 45, № 11. С. 1874–1884. [ Е. М. Antipov et. al., “Structure and deformation behavior of nanocomposites based on low density polyethylene and modified clays”, (in Russian), in Tall. Conn. Ah., vol. 45, no. 11, pp. 1874-1884, 2003. ]
5. **Структура** и деформационное поведение нанокомпозитов на основе полипропилена и модифицированных глин / Е. М. Антипов и др. //

Высокомолек. соед. А. 2003. Т. 45. № 11. С. 1885–1899. [ E. M. Antipov et. al. "Structure and deformation behavior of nanocomposites based on polypropylene and modified clays", (in Russian) in *Tall. Conn. Ah.* vol. 45, no. 11, pp. 1885-1899. 2003 ]

6. **Ломакин С. А., Заиков Г. Е.** Полимерные нанокомпозиты пониженной горючести / С. А. Ломакин, Г. Е. Заиков // *Высокомолекулярные соединения.* 2005. №1. С. 104–120. [ S. A. Lomakin, G. E. Zaikov, "Polymer nanocomposites of reduced Flammability", (in Russian), in *Visokomolekularnie soedinenia*, no. 1, pp. 104-120, 2005. ]

7. **Горюшкин В. В.** Технологические свойства бентонитов палеоцена воронежской антеклизы и возможности их изменения / В. В. Горюшкин // *Вестник Воронежского университета. Геология.* 2005. № 1. С. 166–177. [ V. V. Goriushkin, "Technological properties of bentonites Paleocene of the Voronezh ANTECLISE and their changes", (in Russian), in *Vestnik Voronezhskogo Universiteta. Geology*, no. 1, pp. 166-177, 2005. ]

8. **Микитаев А. К., Козлов Г. В.** Эффективность усиления полимерных нанокомпозитов дисперсными наночастицами / А. К. Микитаев, Г. В. Козлов // *Materials Physics and Mechanics.* 2014. №1. С. 51–57. [ A. K. Mikitaev, G. V. Kozlov, "Efficiency of polymer nanocomposites amplification by dispersed nanoparticles", (in Russian), in *Materials Physics and Mechanics*, no. 1, pp. 51-57, 2014. ]

**Key words:** composite; modifier; temperature; cycles; structure; fiber; matrix.

#### About authors:

**SOLOVIEV, Pavel Vladimirovich**, Assistant Prof., Dept. of Materials Technology and Metals Physics. Dipl. Engineer (UGATU, 2009). Can. of Tech. Sci. (UGATU, 2016). Researches in area of mechanics and manufacturing technology of products made of composite materials.

**DMITRIEV, Nikita Nikolayevich**, Master student of USATU, Dept. of Materials Technology and Metals Physics, theme of master's thesis is "The influence of operational factors on the mechanical properties of composite carbon plastics for aircraft engines industry", Dipl. of bachelor (USATU, 2017).

#### ОБ АВТОРАХ

**СОЛОВЬЕВ Павел Владимирович**, доц. каф. материаловедения и физики металлов. Дипл. инж. (УГАТУ, 2009), дипл. канд. техн. наук. (УГАТУ, 2016). Иссл. в обл. мех-ки и технологии изгот. издел. из композиц. материалов.

**Дмитриев Никита Николаевич**, магистрант УГАТУ каф. МиФМ, тема магистерской диссертации «Влияние эксплуатационных факторов на механические свойства композитных углепластиков для авиадвигателестроения», дипл. бак. (УГАТУ, 2017).

#### METADATA

**Title:** Technological and operational parameters influence on the carbon composite mechanical properties

**Authors:** P. V. Soloviev<sup>1</sup>, N. N. Dmitriev<sup>2</sup>

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> paulnighingale@mail.ru, <sup>2</sup> dmitriev.ikita@rambler.ru

**Language:** Russian.

**Source:** *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 2 (84), pp. 75-80, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The article is regarded to the thermocyclic tests effect on the strength of carbon composite modified with mineral filler in order to increase its high temperature resistance. A comparison of the obtained data with unmodified carbon composite is presented, and a study of the carbon composite structure before and after the modifier addition is mentioned. The results of the study reveal the effect of cyclically varying temperatures on the state of the carbon composite and allow to know the change in the composite strength properties after the matrix has been modified.