

Научная статья
УДК 629.7.023
DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28105>

B.E. Стрижиус 

Национальный исследовательский университет "МАИ",
Москва, Россия

 vitaly.strizhius@gmail.com

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ УГЛЕНАНОКОМПОЗИТА ВКУ-18тр И УГЛЕПЛАСТИКА КМУ-4-2М-3692

Аннотация. При модификации углепластиков углеродными наночастицами особое значение приобретает оценка эффективности такой модификации с точки зрения повышения показателей механических свойств по сравнению с аналогом. Особый интерес вызывает сравнение характеристик усталостной прочности модифицированных углепластиков и аналогов, так как именно эти характеристики определяют эксплуатационные качества материалов. Рассмотрены прочностные свойства угленанокомпозита ВКУ-18тр и аналога – углепластика КМУ-4-2м-3692. Отмечено, что детальное сравнение ключевых характеристик усталостной прочности этих пластиков в открытых публикациях отсутствует. С целью проведения такого сравнения выбрано три метода и три вида сравнения: сравнение усталостной долговечности материалов при симметричном цикле нагружения; сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации остаточной прочности; сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации жесткости. Несмотря на определенную условность проведенных сравнений отмечено значительное преимущество основных характеристик усталостной прочности угленанокомпозита ВКУ-18тр по сравнению с аналогом – углепластиком КМУ-4-2м-3692. Квоты превосходства достигают значений 125–536%. Очевидно, что подобное преимущество может оказаться крайне важным свойством при проектировании особо ответственных силовых элементов конструкций (например, композитных панелей крыльев самолетов).

Ключевые слова: углепластики, углеродные наночастицы, кривые усталости, деградация остаточной прочности, деградация жесткости.

Для цитирования:

Стрижиус В.Е. Сравнение характеристик усталостной прочности угленанокомпозита ВКУ-18тр и углепластика КМУ-4-2м-3692 // Материаловедение. Энергетика. 2022. Т. 28, № 1. С. 67–77. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28105>

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28105>

V.E. Strizhius 

National Research University "Moscow Aviation Institute",
Moscow, Russia

 vitaly.strizhius@gmail.com

COMPARISON OF FATIGUE STRENGTH CHARACTERISTICS OF VKU-18TR CARBON NANOCOMPOSITE AND KMU-4-2M-3692 CARBON FIBER COMPOSITE

Abstract. When carbon fiber plastics are modified with carbon nanoparticles, it is particularly important to evaluate the effectiveness of such modification in terms of increasing the mechanical properties compared to the analog. Of particular interest is the comparison of the fatigue strength characteristics of modified carbon fiber plastics and analogs, since it is these characteristics that determine the performance qualities of materials. The strength properties of VKU-18tr carbon nanocomposite and its analog, KMU-4-2m-3692 carbon fiber, are considered. It is noted that there is no detailed comparison of the key fatigue strength characteristics of these plastics in open publications. In order to conduct such a comparison, three methods and three types of comparison were chosen: comparison of the fatigue life of materials with a symmetrical loading cycle; comparison of the fatigue life of materials until a certain level of degradation of residual strength is reached; comparison of the fatigue life of materials until a certain level of degradation of stiffness is reached. Despite the certain conditionality of the comparisons, a significant advantage of the main characteristics of the fatigue strength of the VKU-18tr carbon nanocomposite compared to its analog, KMU-4-2m-3692 carbon fiber, is noted. The superiority quotas reach values of 125–536%. It is obvious that such an advantage can be an extremely important property in the design of particularly critical power elements of structures (for example, composite wing panels of aircrafts).

Keywords: carbon fiber plastics, carbon nanoparticles, S-N curves, degradation of residual strength, degradation of stiffness.

Citation:

V.E. Strizhius, Comparison of fatigue strength characteristics of VKU-18tr carbon nanocomposite and KMU-4-2m-3692 carbon fiber composite, Materials Science. Power Engineering, 28 (01) (2022) 67–77, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28105>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Известно, что в одним из наиболее эффективных направлений нанотехнологии является разработка наномодифицированных материалов на основе волокнистых армирующих наполнителей и полимерных связующих, содержащих в своем составе нанообъекты. Как правило, такие нанокомпозиты предназначаются для использования в высоконагруженных деталях авиационной, ракетно-космической и других отраслях промышленности.

В случае наномодификации конструкционных композитов на основе углеродных армирующих наполнителей наиболее часто используются фуллероидные наночастицы: фуллерены, астралены, нанотрубки [1].

Технология наномодификации углепластиков достаточно сложна. Введение углеродных наночастиц в состав связующего производится на стадии приготовления связующего, используемого для изготовления препрега. При воздействии ультразвукового поля наночастицы диспергируются в растворителе, используемом для приготовления связующего, с образованием суспензии.



Полученная суспензия смешивается с компонентами связующего, доводится до требуемой концентрации компонентов и содержащихся в нем наночастиц. После чего производится пропитка углеродного наполнителя связующим, содержащим наночастицы, затем сушка полученного препрега. Последующие операции изготовления наномодифицированного углепластика остаются без изменений [1].

При модификации углепластиков углеродными наночастицами особое значение приобретает оценка эффективности такой модификации с точки зрения повышения показателей механических свойств по сравнению с аналогом. Особый интерес вызывает сравнение характеристик усталостной прочности, так как именно эти характеристики определяют эксплуатационные качества материалов.

В ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ разработан состав угленанокомпозита, получивший марку ВКУ-18тр [1]. В качестве компонентов для материала ВКУ-18тр были использованы: связующее ЭНФБ-2М, равнопрочная ткань фирмы “Porcer Ind.” артикул 3692 и наночастицы астралена марки NTS в количестве 0,5% от весового содержания отверженной матрицы.

В качестве аналога этому пластику в работе [1] представлен углепластик КМУ-4-2м-3692 на основе тех же компонентов: связующего ЭНФБ-2М, углеродной ткани артикул 3692, но не содержащий в составе наночастиц астралена.

В работе [1] представлено сравнение некоторых прочностных свойств пластиков ВКУ-18тр и КМУ-4-2м-3692. Однако детальное сравнение *ключевых характеристик усталостной прочности* рассматриваемых пластиков в этой работе отсутствует. В других открытых публикациях по теме наноматериалов (например, в работах [2–3]), такое сравнение также не представлено.

По результатам обзора данных работ [4–10] можно сделать вывод, что в качестве *ключевых характеристик усталостной прочности* слоистых композитов обычно используются следующие:

1. Усталостная долговечность материалов при симметричном цикле нагружения.
2. Усталостная долговечность материалов до достижения определенного уровня деградации остаточной прочности.
3. Усталостная долговечность материалов до достижения определенного уровня деградации жесткости.

Целью настоящей работы является проведение сравнения таких характеристик для выбранных материалов.

Методы сравнения характеристик усталостной прочности

Сравнение усталостной долговечности материалов при симметричном цикле нагружения

Известно, что кривые усталости материалов являются важнейшим элементом анализа одного из главных аспектов усталостной прочности слоистых композитов – усталостной долговечности. Именно с использованием кривых усталости как правило выполняется сравнение усталостных долговечностей различных материалов.

По результатам обзора и анализа данных, представленных в работах [4, 11–15], можно сделать вывод, что для целого ряда типовых элементов композитных конструкций, работающих в условиях одноосного растяжения-сжатия, могут быть построены «классические» $\sigma - N$ кривые усталости вида:

$$\sigma_{\max} = c + d \lg N, \quad (1)$$

где σ_{\max} – максимальные нормальные номинальные (в сечении «брутто», средние в пакете слоев) напряжения циклического растяжения-сжатия рассматриваемого образца или элемента; N – усталостная долговечность элемента; c и d – параметры уравнения (1).

Таблица 1

Вид уравнений (1) для рассматриваемых пластиков

Table 1

Type of equations (1) for the plastics under consideration

Пластик	Уравнение (1)
ВКУ-18тр	$\sigma_a^{R=-1} = 1250 - 138,57 \times \lg N$
КМУ-4-2м-3692	$\sigma_a^{R=-1} = 1150 - 129,71 \times \lg N$

Следует отметить, что значение параметра «*c*» в представленных уравнениях равно: $c = \sigma_{UCS}$, где σ_{UCS} – предел прочности рассматриваемых пластиков на сжатие.

Графические зависимости $\sigma_a^{R=-1} = f(N)$, построенные для рассматриваемых пластиков с использованием уравнений (1), представлены на рис. 1.

Сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации остаточной прочности

Известно, что деградация остаточной прочности при накоплении усталости в полимерных композиционных материалах (ПКМ) является достаточно неприятной особенностью ПКМ, практически не встречающейся в металлических элементах конструкций. Ввиду этого оценка уровня деградации остаточной прочности ПКМ является обязательной.

Расчетно-экспериментальная оценка уровня деградации остаточной прочности элементов из ПКМ наиболее часто выполняется с использованием *модели деградации нормализованной прочности*.

По результатам обзора и анализа данных, представленных в работах [4–6], можно сформировать следующие основные положения и допущения этой модели.

1. Уровень снижения остаточной прочности в процессе накопления усталости конструктивного элемента из ПКМ зависит от конструктивно-технологических особенностей рассматриваемого элемента (типа ПКМ, параметров укладки, толщины, типа концентратора напряжения и т.д.), механических и усталостных характеристик рассматриваемого элемента. В работах [4–6] делается допущение, что механические и усталостные характеристики при одноосном растяжении элемента могут быть связаны зависимостью:

$$t^a + s^b = 1, \quad (2)$$

где $t = (\lg n - \alpha) / (\lg N - \alpha)$ – функция нагружения; n – количество циклов нагружения при уровне максимальных напряжений цикла σ_{max} ; N – количество циклов нагружения до разрушения рассматриваемого элемента при уровне напряжений σ_{max} ; α – константа, $\alpha = \lg(0,25) = -0,6021$; $s = (\sigma_{RS} - \sigma_{max}) / (\sigma_{UTS} - \sigma_{max})$ – относительная остаточная прочность элемента из ПКМ; σ_{RS} – остаточная прочность элемента из ПКМ; σ_{UTS} – предел прочности рассматриваемого элемента при растяжении; a и b – параметры, зависящие от свойств материала и окружающей среды.

2. На основе зависимости (2) в работах [4–6] получено соотношение для оценки остаточной прочности рассматриваемого элемента в процессе накопления усталости:

$$\sigma_{RS} = (\sigma_{UTS} - \sigma_{max}) \left(1 - t^a\right)^{\frac{1}{b}} + \sigma_{max}$$

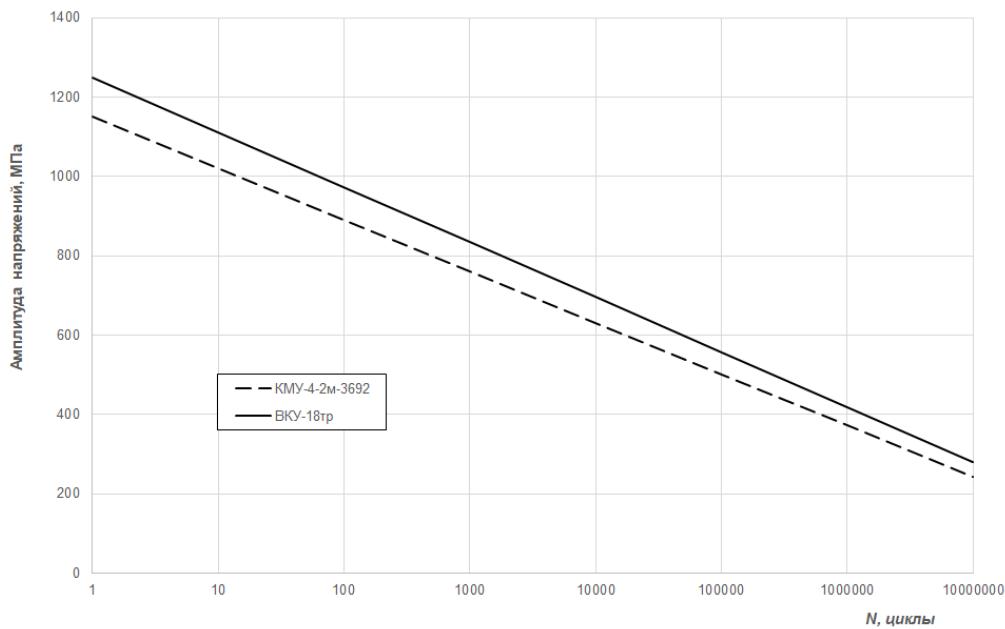


Рис. 1. Кривые усталости пластиков BKU-18tr и KMY-4-2M-3692

Fig. 1. S-N curves for the plastics BKU-18tr and KMY-4-2M-3692

или

$$\sigma_{RS} = (\sigma_{UTS} - \sigma_{max}) \left(1 - \left(\frac{\lg(n) - \alpha}{\lg(N) - \alpha} \right)^a \right)^{\frac{1}{b}} + \sigma_{max}. \quad (3)$$

По данным работы [4] параметры a и b для пластиков типа CFRP (пластик, армированный углеродным волокном), KFRP (пластик, армированный кевларовым волокном) и GRP (пластик, армированный стекловолокном) принимают значения, близкие к значениям, представленным в табл. 2.

Таблица 2
Значения параметров a и b для пластиков типа CFRP, KFRP и GRP (по данным работы [4])
Table 2
Values of parameters a and b for plastics of the type CFRP, KFRP
and GRP (according to the data of [4])

Тип пластика	a	b
CFRP	1,8	23,1
KFRP	1,8	5,2
GRP	1,5	4,8

Очевидно, что значения параметров a и b будут оказывать значительное влияние на форму кривой снижения остаточной прочности " $\sigma_{RS} - N$ " и получаемые с использованием этой кривой конечные результаты оценок остаточной прочности. Поэтому с целью получения достаточно до-

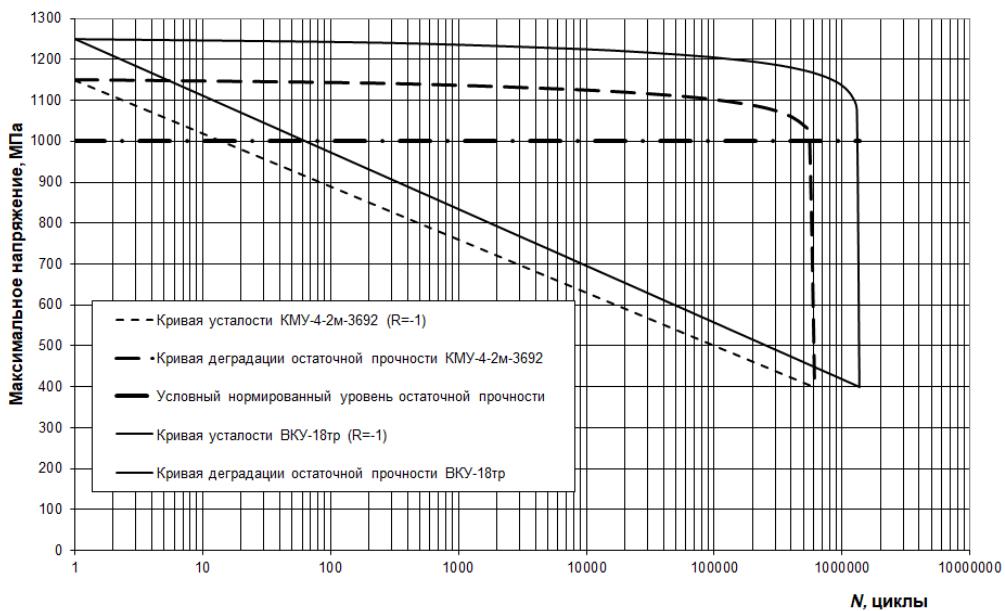


Рис. 2. Графические зависимости (1) и (3) для пластиков ВКУ-18тр и КМУ-4-2м-3692

Fig. 2. Graphical dependencies (1) and (3) for the plastics ВКУ-18тр and КМУ-4-2м-3692

стверных результатов таких оценок для каждого рассматриваемого элемента из ПКМ значения параметров a и b должны уточняться по результатам специально проведенных испытаний.

Графические зависимости $\sigma_{rs} = f(N)$, построенные для рассматриваемых пластиков с использованием зависимости (3) при условном уровне циклических напряжений $\sigma_a^{R=-1} = 400$ МПа, представлены на рис. 2.

При построении зависимостей принято допущение, что для рассматриваемых пластиков могут быть приняты значения параметров a и b , указанные в табл. 2 для углепластиков (CFRP).

Сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации жесткости

Известно, что деградация жесткости при накоплении усталости в слоистых композитах также является достаточно неприятным свойством ПКМ. Жесткость является одной из ключевых характеристик как статической, так и усталостной прочности ПКМ, поэтому необходимость анализа процесса деградации жесткости в процессе накопления усталости очевидна. Следует также отметить, что остаточная жесткость очень часто используется как «неразрушающая» мера оценки повреждения ПКМ.

Расчетно-экспериментальных оценка уровня деградации жесткости элементов из ПКМ наиболее часто выполняется с использованием модели деградации нормализованной жесткости.

По результатам обзора и анализа данных, представленных в работах [5–6], можно сформировать следующие основные положения такой модели.

1. Остаточная жесткость композиционного материала также, как и остаточная прочность, является функцией уровня и числа циклов приложенных напряжений.
2. Для представления остаточной жесткости как функции числа циклов в работах [5–6] предложено следующее уравнение:

$$E(n) = \left(E_s - \frac{\sigma}{\varepsilon_f} \right) \times \left(1 - \left(\frac{\lg(n) - \lg(0.25)}{\lg(N_f) - \lg(0.25)} \right)^{\lambda} \right)^{\frac{1}{\gamma}} + \frac{\sigma}{\varepsilon_f}, \quad (4)$$

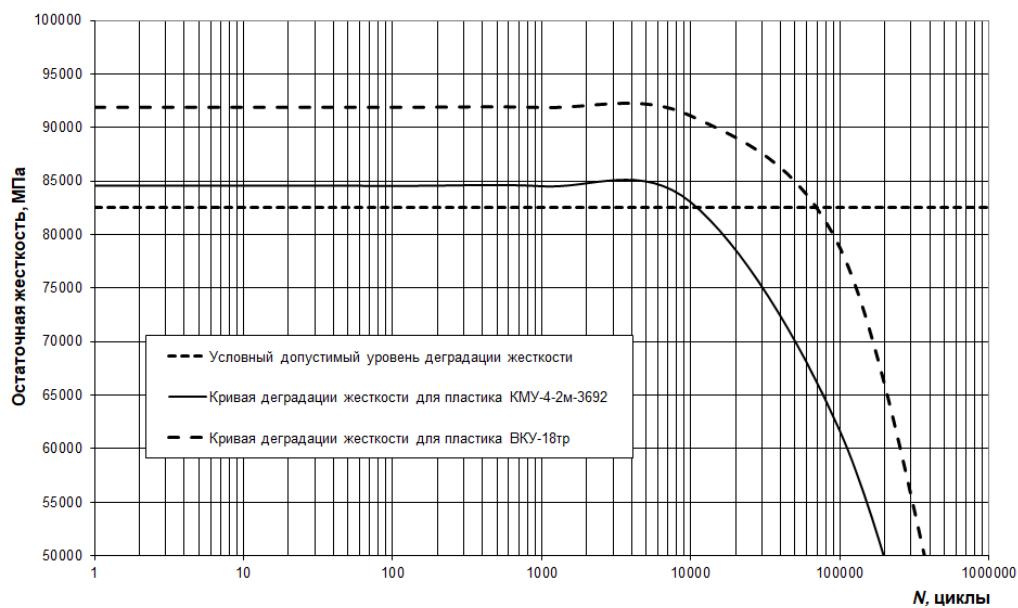


Рис. 3. Графические зависимости (4) для пластиков BKU-18тр и KMU-4-2м-3692

Fig. 3. Graphical dependencies (4) for the plastics BKU-18tr and KMU-4-2m-3692

где $E(n)$ – остаточная жесткость; E_s – начальная (статическая) жесткость; σ – величина прикладываемых напряжений; ε_f – средняя деформация при статическом разрушении; n – число приложенных циклов; N_f – усталостная долговечность (число циклов до разрушения) при уровне напряжений σ ; λ и γ – экспериментальные параметры.

Графические зависимости $E(n) = f(n)$ для рассматриваемых пластиков получены с использованием соотношения (4) и представлены на рис. 3.

При построении зависимостей приняты некоторые допущения и использованы следующие уравнения и значения:

1. $\varepsilon_f = 0,0136$ – средняя деформация при статическом разрушении – значение принято на основании данных работы [6].

2. $E_s = \frac{\sigma_{UCS}}{\varepsilon_f} = \frac{1250}{0,0136} = 91912$ МПа – начальная (статическая) жесткость для пластика BKU-18тр.

3. $E_s = \frac{\sigma_{UCS}}{\varepsilon_f} = \frac{1150}{0,0136} = 84559$ МПа – начальная (статическая) жесткость для пластика KMU-4-2m-3692.

4. $\sigma_a^{R=-1} = 400$ МПа – условный уровень циклических напряжений.

5. Значения N_f определяются с использованием уравнений кривых усталости, представленных в табл. 1.

6. $\lambda = 14,57$ и $\gamma = 0,3024$ – значения параметров λ и γ – приняты на основании данных работы [6].

7. 82500 МПа – условный допустимый уровень деградации жесткости.

Результаты

Кривые усталости для рассматриваемых пластиков, построенные с использованием уравнений (1) (см. табл. 1) представлены на рис. 1. Результаты сравнения усталостных долговечностей пластиков при условном уровне циклических напряжений $\sigma_a^{R=-1} = 400$ МПа представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительные свойства усталостной прочности пластиков КМУ-4-2м-3692 и ВКУ-18тр

Table 3

Comparative properties of fatigue strength of plastics КМУ-4-2м-3692 and ВКУ-18тр

Свойство (усталостная долговечность)	КМУ-4-2м-3692	ВКУ-18тр	Квоты превосходства пластика ВКУ-18тр, %
N , циклы	605520	1361700	125
N_{RS} , циклы	550000	1300000	136
N_{RE} , циклы	11000	70000	536

Графические зависимости $\sigma_{RS} = f(N)$ для рассматриваемых пластиков при условном уровне циклических напряжений $\sigma_a^{R=-1} = 400$ МПа получены с использованием соотношения (3) и представлены на рис. 2. Результаты сравнения усталостных долговечностей пластиков до достижения условного уровня остаточной прочности $\sigma_{RS} = 1000$ МПа представлены в табл. 3

Графические зависимости $E(n) = f(n)$ для рассматриваемых пластиков, построенные с использованием соотношения (4) при условном уровне циклических напряжений $\sigma_a^{R=-1} = 400$ МПа, представлены на рис. 3. Результаты сравнения усталостных долговечностей пластиков до достижения условного допустимого уровня деградации жесткости 82500 МПа представлены в табл. 3.

Обсуждение результатов

Не смотря на определенную условность проведенных сравнений можно отметить значительное преимущество основных характеристик усталостной прочности угленанокомпозита ВКУ-18тр по сравнению с аналогом – углепластиком КМУ-4-2м-3692. Квоты превосходства достигают значений 125–536%.

Очевидно, что подобное преимущество может оказаться крайне важным при проектировании особо ответственных силовых элементов конструкций (например, композитных панелей крыльев самолетов).

Однако следует отметить, что при внедрении угленанокомпозитов в реальные конструкции следует особенно тщательно учитывать проблемы технологии производства и стоимость подобных пластиков. Вполне возможно, что эти аспекты могут оказать негативное влияние на широкое внедрение нанокомпозитов в производство элементов конструкций.

Заключение

Рассмотрены некоторые прочностные свойства угленанокомпозита ВКУ-18тр и аналога – углепластика КМУ-4-2м-3692. Отмечено, что детальное сравнение ключевых характеристик усталостной прочности этих пластиков в открытых публикациях отсутствует.

С целью проведения такого сравнения выбрано три метода и вида сравнения: сравнение усталостной долговечности материалов при симметричном цикле нагружения; сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации остаточной прочности; сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации жесткости.

Не смотря на определенную условность проведенных сравнений можно отметить значительное преимущество основных характеристик усталостной прочности угленанокомпозита ВКУ-18тр по сравнению с аналогом – углепластиком КМУ-4-2м-3692. Квоты превосходства достигли значений 125–536%.

Отмечено, что подобное преимущество может оказаться крайне важным при проектировании особо ответственных силовых элементов конструкций (например, композитных обшивок крыльев самолетов).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Раскутин А.Е., Гуняева А.Г. Конструкционные полимерные угленанокомпозиты – новое направление материаловедения // Электронный научно-технический журнал «Труды ВИАМ». ВИАМ/2011-205794, апрель 2011 г.
- [2] Пономарев А.Н. Нанотехнология и наноструктурные материалы // Индустрія. 2002. № 1. С. 12.
- [3] Гуняев Г.М., Комарова О.А., Ильченко С.И., Алексашин В.М., Пономарев А.Н., Деев И.С., Никишин В.А. Фуллероидные наноматериалы – активные структурные модификаторы полимеров и полимерных композитов // Пластические массы. 2003. № 10. С. 15.
- [4] Harris B. A historical review of the fatigue behavior of fiber-reinforced plastics, Fatigue in composites, Ed. by B. Harris. – Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.
- [5] Shokrieh M.M., Lessard L.B. Fatigue under multiaxial stress systems, Fatigue in composites, Ed. by B. Harris. – Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.
- [6] Khan A.I., Venkataraman S., Miller I. Predicting Fatigue Damage of Composites Using Strength Degradation and Cumulative Damage Model, J. Compos. Sci., 2 (2018).
- [7] Scherban K.S., Zakharenkova A.Yu., Konovalov V.V., Kulikov S.V., Strizhius V.E. Full-Scale Fatigue and Residual Strength Tests of the Composite Wing Box of a Passenger Aircraft, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2-7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.
- [8] Захаренкова А.Ю., Коновалов В.В., Куликов С.В., Стрижиус В.Е., Федотов М.А., Щербань К.С., Яшутин А.Г. Испытания на усталость и остаточную прочность композитного кессона крыла пассажирского самолета // Ученые записки ЦАГИ. 2019. Т. I. № 3. С. 61–73.
- [9] Стрижиус В.Е. Методика комплексной расчетной оценки усталостной долговечности элементов композитных авиаконструкций // Научный вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23. № 2. С. 59–71.
- [10] Тудупова А.Н., Стрижиус В.Е., Бобрович А.В. Расчетно-экспериментальная оценка ресурсных характеристик композитных панелей крыла самолета транспортной категории // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 4. С. 21–27.
- [11] Mandell J.F. Fatigue behaviour of fibre-resin composites, Developments in Reinforced Plastics 2 (editor Pritchard G.), (Applied Science Publishers, London), 1986, Pp. 67–108.
- [12] Nijssen R.P.L. Phenomenological fatigue analysis and life modelling, Fatigue life prediction of composites and composite structures, Ed. by Anastasios P. Vassilopoulos. – Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2010.
- [13] Burhan I., Kim H.S. S-N Curve Models for Composite Materials Characterisation: An Evaluative Review, J. Compos. Sci., 2(38) (2018).
- [14] Strizhius V.E. Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2-7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.
- [15] Strizhius V.E. Fatigue life prediction of laminated composites using normalized S-N data, Materials Science. Power Engineering, 26(03) (2020) 20–32.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

СТРИЖИУС Виталий Ефимович – профессор, Национальный исследовательский университет "МАИ", д-р техн. наук.

E-mail: vitaly.strizhius@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7575-7425>

REFERENCES

- [1] G.M. Gunyaev, L.V. Chursova, O.A. Komarova, A.E. Raskutin, A.G. Gunyaeva A.G., Structural polymer carbon nanocomposites – a new direction of materials science, Electronic scientific and technical journal "Proceedings of VIAM", VIAM/2011-205794, (2011).
- [2] A.N. Ponomarev, Nanotechnology and nanostructured materials, Industry, 1 (2002) 12.
- [3] G.M. Gunyaev, O.A. Komarova, S.I. Ilchenko, V.M. Aleksashin, A.N. Ponomarev, I.S. Deev, V.A. Nikitin, Fulleroid nanomaterials – active structural modifiers of polymers and polymer composites, Plastic masses, 10 (2003) 15.
- [4] B. Harris, A historical review of the fatigue behavior of fiber-reinforced plastics, Fatigue in composites, Ed. by B. Harris. – Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.
- [5] M.M. Shokrieh, L.B. Lessard, Fatigue under multiaxial stress systems, Fatigue in composites, Ed. by B. Harris. – Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.
- [6] A.I. Khan, S. Venkataraman, I. Miller, Predicting Fatigue Damage of Composites Using Strength Degradation and Cumulative Damage Model, J. Compos. Sci., 2 (2018).
- [7] K.S. Scherban, A.Yu. Zakharenkova, V.V. Konovalov, S.V. Kulikov, V.E. Strizhius, Full-Scale Fatigue and Residual Strength Tests of the Composite Wing Box of a Passenger Aircraft, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2-7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.
- [8] A. Zakharenkova, V.V. Konovalov, S.V. Kulikov, V.E. Strizhius, M.A. Fedotov, K.S. Shcherban, A.G. Ashutin, Fatigue and the residual strength test of a composite wing box of a passenger aircraft, Uchenye Zapiski TSAGI, I(3) (2019) 61–73.
- [9] V.E. Strizhius, Method of complex estimation of the fatigue life of composite elements aviation structure, Scientific Bulletin of MGTU CA, 23 (2) (2020) 59–71.
- [10] A.N. Tulupova, V.E. Strizhius, A.V. Bobrovich, Computational and experimental evaluation of fatigue characteristics of composite panels of a transport category aircraft wing, Bulletin of the Moscow Aviation Institute, 27(4) (2020) 21–27.
- [11] J.F. Mandell, Fatigue behaviour of fibre-resin composites, Developments in Reinforced Plastics 2 (editor Pritchard G.), (Applied Science Publishers, London), 1986, Pp. 67–108.
- [12] R.P.L. Nijssen, Phenomenological fatigue analysis and life modelling, Fatigue life prediction of composites and composite structures, Ed. by Anastasios P. Vassilopoulos. – Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2010.
- [13] I. Burhan, H.S. Kim, S-N Curve Models for Composite Materials Characterisation: An Evaluative Review, J. Compos. Sci., 2 (38) (2018).
- [14] V.E. Strizhius, Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2-7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.
- [15] V.E. Strizhius, Fatigue life prediction of laminated composites using normalized S-N data, Materials Science. Power Engineering, 26 (03) (2020) 20–32.

THE AUTHOR

STRIZHIUS Vitaly E. – *National Research University "Moscow Aviation Institute"*.
E-mail: vitaly.strizhius@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7575-7425>

Статья поступила в редакцию 05.03.2022; одобрена после рецензирования 10.03.2022; принята к публикации 23.03.2022.

The article was submitted 05.03.2022; approved after reviewing 10.03.2022; accepted for publication 23.03.2022.