

УДК 620.178.4

## ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

<sup>1</sup>Нихамкин М.А., <sup>1</sup>Конев И.П., <sup>1</sup>Саженов Н.А., <sup>1</sup>Самодуров Д.А., <sup>2</sup>Торопицина А.В.

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,  
e-mail: nikhamkin@mail.ru, sazhenkov\_na@mail.ru, samodurovdanil@gmail.com;

<sup>2</sup>ОАО «Авиадвигатель», Пермь

Основной проблемой, ограничивающей частоту нагружения полимерных композиционных материалов в ходе усталостных испытаний, является объемный гистерезисный саморазогрев, который может значительно повлиять на получаемые усталостные характеристики. Главная задача исследования заключалась в определении теплового состояния образцов из углепластика во время усталостных испытаний на испытательной машине резонансного типа и разработке методики, не искажающей усталостные характеристики. Определение теплового состояния образцов производилось с помощью тепловизора. Выявлено, что скачок температуры в точке присоединения захватов испытательной машины к защитным накладкам образца вызван особенностями деформирования и разрушения клеевого слоя между исследуемым материалом и накладками. В работе представлена система воздушного охлаждения, позволяющая снизить температуры в зоне разогрева до 50–60 °С, что составляет 42 % от температуры стеклования полимерной матрицы. Предложено использование образцов без защитных накладок для исключения проблемы локального разогрева, в то же время отсутствие защитных накладок не приводит к занижению получаемых усталостных характеристик. Максимальная температура образца без накладок в ходе усталостных испытаний снижается до 31 °, что всего на 7,50 ° выше комнатной температуры и составляет 19 % от температуры стеклования полимерной матрицы. Результаты работы могут быть применены при разработке методик усталостных испытаний полимерных композиционных материалов с высокой частотой нагружения.

**Ключевые слова:** усталостные испытания, предел выносливости, полимерные композиционные материалы, резонансные испытательные машины, контроль теплового состояния

## THERMAL STATE OF A CARBON FIBER SPECIMEN UNDER FATIGUE TEST

<sup>1</sup>Nikhamkin M.A., <sup>1</sup>Konev I.P., <sup>1</sup>Sazhenkov N.A., <sup>1</sup>Samodurov D.A., <sup>2</sup>Toropitsina A.V.

<sup>1</sup>Perm national research polytechnic university, Perm,

e-mail: nikhamkin@mail.ru, sazhenkov\_na@mail.ru, samodurovdanil@gmail.com;

<sup>2</sup>OGSC «Aviadvigatel», Perm

The major problem limiting increase of loading frequency of polymer composite material during fatigue tests is volumetric hysteric self-heating which can have a significant effect on received fatigue characteristics of the material. The main goal of the study is to estimate the thermal state of carbon fiber specimens during fatigue tests using high frequency pulsator of a resonance type and to develop the testing technique without distortion of fatigue characteristics. Thermal state evaluation of test pieces was conducted using an infrared camera. The evaluation shows that temperature jump in the attachment point of the grips of the testing machine to the sample safety plates is a result of specificity of strain and destruction of the adhesive layer between polymer composite and safety plates. This study represents an air-cooling system, that allows to lower temperature of the samples in the heating zone to 50–60 °С, which comprises 42 % of glass transition temperature of plastic binder. It was suggested to use the samples without safety plates in order to avoid the problem of local heating; which is more, absence of the safety plates does not lead to decrease of received fatigue characteristics. When using the samples without plates maximum temperature of the sample during a testing drops to 31 °С; it is only 7,50 °С higher than room temperature and it comprises 19 % of glass transition temperature of plastic binder. The results of this work can be applied to development of the testing technique and during fatigue testing of polymer composite material with high loading frequency.

**Keywords:** fatigue tests, fatigue limit, polymer composite materials, resonant test machines, the check of the thermal state

Важным этапом обеспечения надежности деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ), работающих при циклических нагрузках, является определение характеристик сопротивления усталостному разрушению [1, 9].

Экспериментальное определение характеристик усталостной прочности ПКМ предполагает проведение усталостных испытаний образцов с построением кри-

вой усталости и определением условного предела выносливости. Международный стандарт ASTM D 3479/D 3479M [6], регламентирующий проведение усталостных испытаний ПКМ на растяжение, предусматривает проведение испытаний с поддержанием в процессе нагружения размаха нагрузки («жесткий» цикл) или деформаций («мягкий» цикл). При проведении испытаний на сервогидравли-

ческих испытательных машинах обычно реализуются частоты нагружения в пределах 1–10 Гц [8], что делает испытания с базой больше одного миллиона циклов весьма длительными, а в ряде случаев – невозможными. Испытательные машины электрорезонансного типа могут обеспечить проведение испытаний с частотой нагружения до 100 Гц и выше [2], что дает возможность существенно снизить длительность и трудоемкость испытаний.

Основная проблема, ограничивающая повышение частоты нагружения при испытаниях ПКМ, – объемный гистерезисный саморазогрев материала, который способен оказать существенное влияние на получаемые характеристики сопротивления усталости. В работе [3] показано, что с ростом температуры испытаний до 160–180 °С, соответствующей температуре начала затвердения полимерной матрицы, прочностные характеристики углепластика начинают снижаться на 10–25 % по сравнению со значениями, полученными при комнатной температуре. Резкое снижение прочности до 80 % наблюдается при росте температуры испытаний до температуры максимума реакции затвердения, составляющей в зависимости от материала 180–200 °С [2, 3]. Резкое снижение прочности ПКМ объясняется тем, что выше указанных температур начинается процесс расстеклования полимерной матрицы [5]. В работе [7] показано, что при обеспечении эффективного охлаждения образцов струями воды возможно увеличение частоты нагружения при усталостных испытаниях ПКМ до 300 Гц и выше.

Цель настоящей работы состоит в получении количественных оценок саморазогрева образцов из углепласти-

ка в процессе усталостных испытаний с повышенной частотой нагружения с использованием испытательных машин электрорезонансного типа и отработке методики проведения испытаний без искажения результатов вследствие саморазогрева образцов.

### Материалы и методы исследования

Исследуемый углепластик изготовлен на основе однонаправленной углеродной ткани, пропитанной эпоксидным связующим, схема укладки слоев  $[0, 90]_n$ . Диапазон температур стеклования связующего  $T_g = 160–190$  °С [3], рекомендуемая температура эксплуатации материала – до 80 °С [1].

Образцы для усталостных испытаний – прямоугольные толщиной 2,7 мм с накладками под захваты толщиной 1,3 мм (рис. 1). Накладки приклеены к образцу эпоксидным клеем. Такие образцы допускаются стандартом ASTM D 3479 [3].

Испытания проводили на электрорезонансной испытательной машине Zwick HFP 5100, образцы устанавливали в плоские захваты (рис. 2). Испытания проводили при комнатной температуре. В процессе испытаний в соответствии со стандартом ASTM D 3479 поддерживались постоянные значения амплитудного напряжения и коэффициента асимметрии в цикле нагружения. Испытания проводили на базе  $10^6$  циклов с частотой приложения нагрузки 45 Гц. В качестве критериев остановки испытаний выбраны: наработка базового числа циклов, или превышение заданного допуска на изменение амплитудного и среднего значений усилия в цикле нагружения (что происходит на начальной стадии разрушения образца), или полное разрушение образца (расслоение, растрескивание, появление отколов).

Для предотвращения разогрева образца в процессе испытаний испытательная машина была дополнительно оборудована системой воздушного охлаждения, которая представляет собой вентилятор с воздухозаборником и воздуховодом и выполнена таким образом, чтобы скорость воздушного потока была направлена параллельно плоскости образца.

Испытания сопровождалась регистрацией поля температур образца с помощью инфракрасной камеры NEC TH9100 WR.

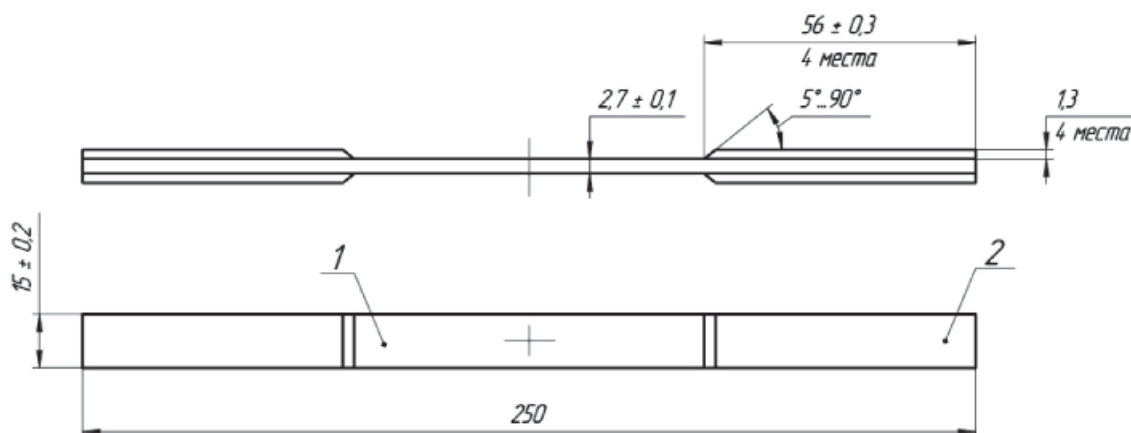


Рис. 1. Образец для усталостных испытаний:  
1 – углепластик; 2 – накладки

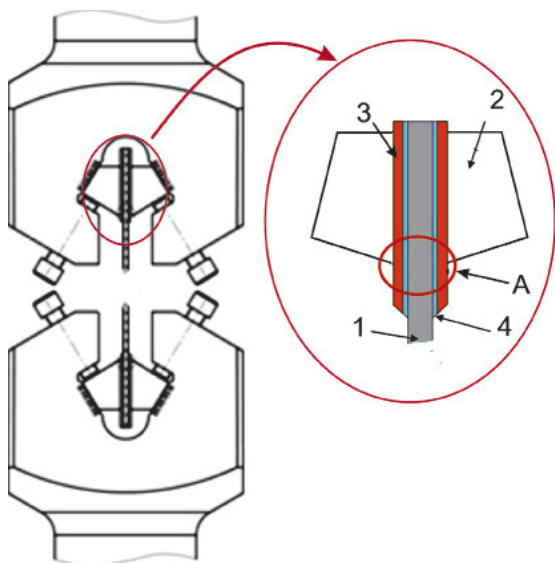


Рис. 2. Схема установки образца в захватах:  
1 – углепластик; 2 – губки захвата;  
3 – накладки; 4 – клеевой слой;  
А – зона локального саморазогрева

### Результаты исследования и их обсуждение

Эксперименты проводили в три этапа с различным уровнем максимальных напряжений в цикле нагружения  $\sigma_{\max}$  и одинаковым коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0,1$ . На первом этапе  $\sigma_{\max}$  составляло 60% от предела выносливости  $\sigma_{R^2}$ , на втором и третьем этапах 80 и 100% соответственно. На каждом этапе эксперименты проводили с использованием воздушного охлаждения и без него.

В таблице приведены термограммы, полученные при съемке боковой поверхности образцов после стабилизации температур. На всех термограммах отмечены значения температуры образцов в центре и вблизи захватов.

Из таблицы видно, что разогрев образцов в процессе испытаний происходит в локальных зонах у края захватов испытательной машины (рис. 2). При максимальном напряжении в цикле нагружения  $\sigma_{\max}$ , равном 60% от предела выносливости  $\sigma_{R^2}$ , максимальная температура образца составила 17,5% от нижней границы температуры стеклования связующего  $T_g$ , при  $\sigma_{\max} = 0,8\sigma_{R^2}$  – около 20%, при  $\sigma_{\max} = \sigma_{R^2}$  – 53%.

Интенсивный разогрев образцов в локальной зоне у края захватов обусловлен, по-видимому, механизмом деформирования и разрушения образца в этой зоне. Сначала возникает интенсивная сдвиговая деформация и разрушение наиболее слабого звена – клеевого слоя 4 (см. рис. 2). Это происходит из-за концентрации напряжений у края захватов 2 и разности деформаций исследуемого материала 1 и частей накладок 3,

прилегающих к нему со стороны рабочей зоны образца. При дальнейшем циклическом нагружении рост температуры в зоне А обусловлен трением между накладками и углепластиком. В свою очередь рост температуры определяет локализацию процесса накопления повреждений вследствие снижения прочностных характеристик, поэтому дальнейшее разрушение образцов происходит именно в этом месте. На рис. 2 показана фотография одного из разрушившихся образцов; видно, что зарождение трещин происходило в зонах локального разогрева.

При низкой частоте циклического нагружения локализация нагрева вследствие трения между исследуемым материалом и накладкой незначительна из-за низкой интенсивности тепловыделения. При высокой частоте нагружения этот эффект приводит к получению заниженных характеристик усталостной прочности.

Применение системы воздушного охлаждения во время испытаний на усталостную прочность понижает максимальную температуру образца на всех исследованных режимах нагружения. При максимальном напряжении в цикле нагружения  $\sigma_{\max} = \sigma_R$  максимальная температура образца снизилась почти на 17°C и составила 42% от нижней границы температуры стеклования  $T_g$ , при  $\sigma_{\max} = 0,8\sigma_R$  – около 19%.

Решением проблемы саморазогрева образцов при усталостных испытаниях может быть использование образцов без защитных накладок. В частности, применение образцов в виде пластины постоянного сечения без накладок («сопрон») не противоречит стандарту [6]. В работе [7] при усталостных испытаниях ПКМ с высокой частотой нагружения использовались плоские образцы без накладок с плавным уменьшением площади сечения в рабочей части.

На рис. 4 показано поле температур образца из исследуемого углепластика с удаленными с одной стороны (верхней) защитными накладками. Образец испытывали при размахе напряжений, равном пределу выносливости  $\sigma_{R^2}$ , при комнатной температуре 23,5°C. Максимальная температура в зоне нижнего захвата составила 53,6°C (на 20,1°C выше комнатной), верхнего – 31°C (на 7,5°C выше комнатной). Температура в зоне верхнего захвата выше температуры рабочей части образца, составившей 29,7°C, всего на 1,3°C. Таким образом, можно считать, что использование образцов без защитных накладок позволяет исключить локальный разогрев в клеевом слое между образцом и накладками при испытаниях с высокими частотами нагружения.

Поля температур на боковой поверхности образцов  
в ходе усталостных испытаний

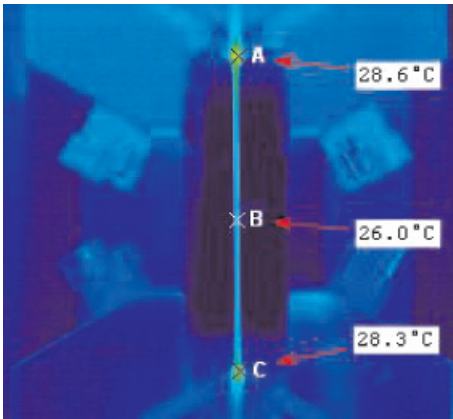
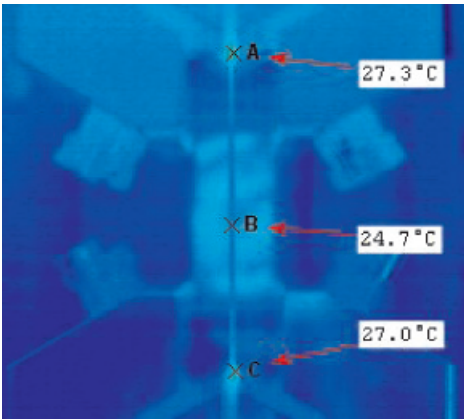
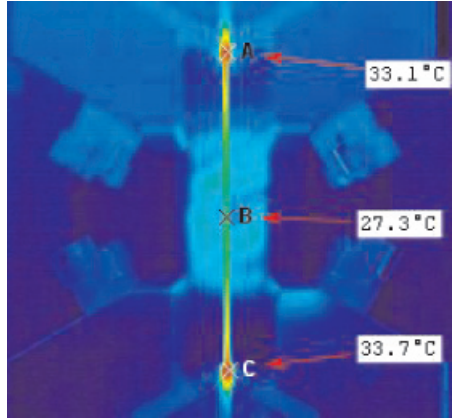
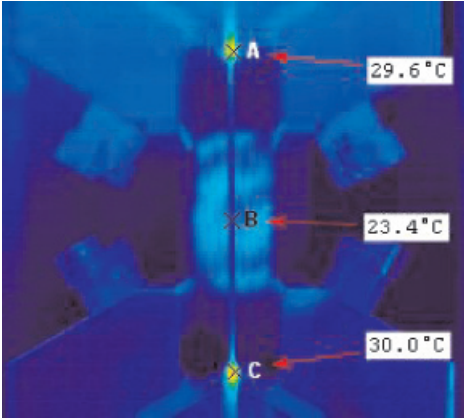
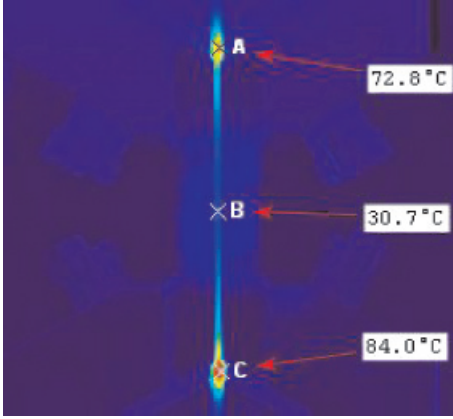
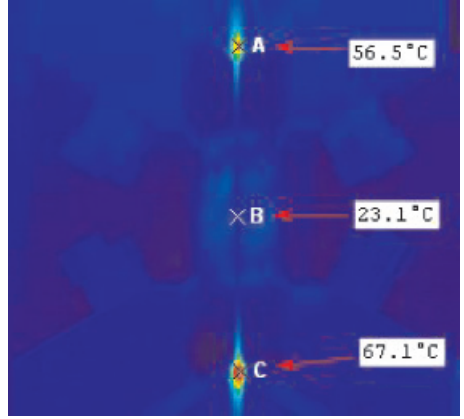
Нагрузка, % от $\sigma_R$	Без охлаждения	С охлаждением
60%		
80%		
100%		



Рис. 3. Пример образца, разрушенного при усталостных испытаниях на машине резонансного типа

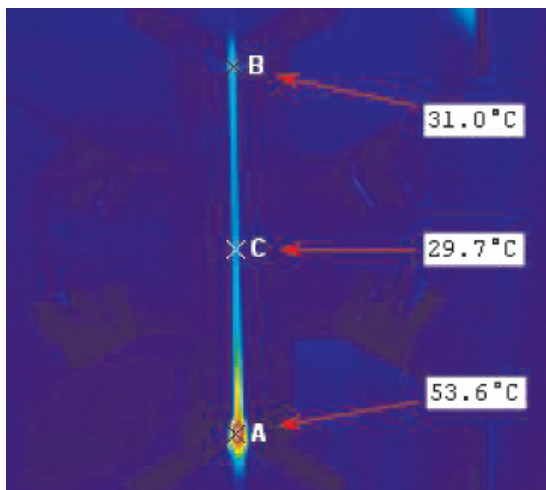


Рис. 4. Поле температур на боковой поверхности образца без защитных накладок с верхней стороны

Отсутствие на образцах защитных накладок не приводит к снижению усталостной прочности образцов. Это было подтверждено в результате контрольного испытания, при котором образец без защитных накладок выдержал без разрушения базовое число циклов нагружения при уровне нагружения, соответствующем пределу выносливости образцов с защитными накладками. Результаты испытаний на электрорезонансной машине с дополнительным воздушным охлаждением образцов исследуемого углепластика при частоте нагружения 45 Гц приведены на рис. 5. Видно, что различие результатов для образцов с защитными накладками и без накладок лежит в пределах рассеяния.

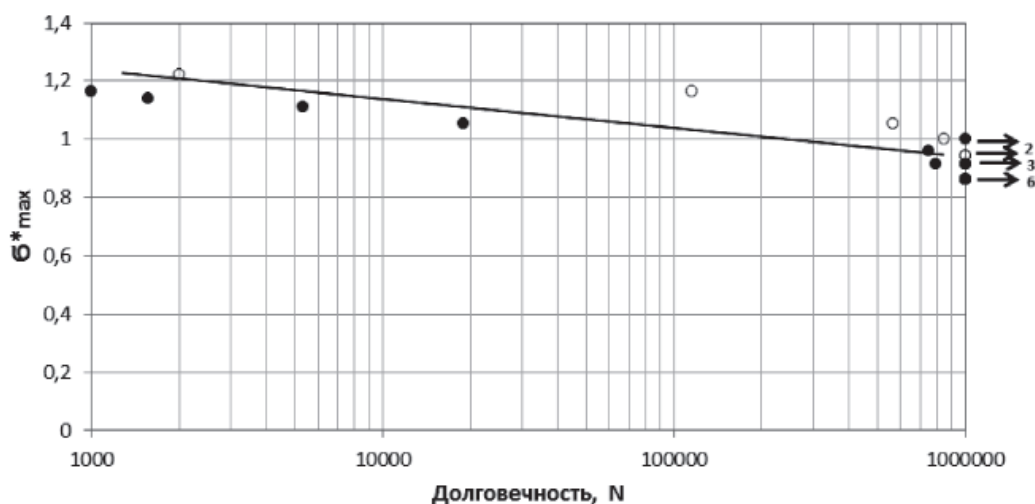


Рис. 5. Кривая усталости исследуемого материала,  $R = 0,1$   
(○ – образцы без защитных накладок; ● – образцы с защитными накладками)

## Выводы

Причина локального разогрева образцов из углепластика с защитными накладками в местах их закрепления в захватах испытательной машины состоит в особенностях деформирования и разрушения клевого соединения исследуемого материала и накладок. Температура в этой зоне зависит от уровня нагрузки и частоты нагружения; при максимальном напряжении в цикле нагружения, равном пределу выносливости, и частоте нагружения 45 Гц она доходит до 53 % температуры стеклования связующего, что может привести к искажению результатов испытаний.

Использование разработанной системы воздушного охлаждения образцов позволяет снизить температуру в зоне разогрева до 42 % температуры стеклования.

Применение образцов без накладок позволяет избавиться от проблемы локального разогрева; при этом отсутствие защитных накладок не приводит к снижению усталостной прочности образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 02.G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

**Список литературы**

1. Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Шипунов Г.С., Третьяков А.А.. Технологии и задачи механики композиционных материалов для создания лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – № 4. – С. 5–44.

2. Вахромеев. А.М. Машины для испытаний на усталость / Московский автомобильно-дорожный институт (государственный технический университет). – М., 2006. – С. 61.

3. Николаев Е.В. Коренькова Т.Г., Шведкова А.К., Валевин Е.О. Исследование влияния температурных факторов на процесс старения новых полимерных композиционных материалов для мотогондолы авиационного двигателя // Электронный научный журнал «ТРУДЫ ВИАМ», ФГУП «ВИАМ». – 2015. – № 3. – ISSN 2307-6046.

4. Степанов В.А. Песчанская Н.Н., Шпейзман. В.В. Прочность и релаксационные явления в твердых телах. – 1984. – С. 246.

5. Энциклопедия полимеров. – М.: Советская энциклопедия, 1977. – Т. 3. – 492 с.

6. ASTM D 3479. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA, 2012.

7. Apinis R. Acceleration of fatigue tests of polymer composite materials by using high-frequency loadings // Mechanics of Composite Materials. – 2004. – Vol. 40, № 2. – P. 107–118.

8. Daggumati S., Baere I. De, Paepge W. Van, Degrieck J., Xu J., Lomov S.V., Verpoest I. Fatigue and post-fatigue stress-strain analysis of a 5-harness satin weave carbon fibre reinforced composite // Composites Science and Technology. – 2013. – Vol. 74. – P. 20–27.

9. Kondo K., Phillips D.C., Pipes R.B., Talreja R., Naslain R.. Comprehensive Composite Materials. Volume 2: Polymer Matrix Composites. Elsevier Science & Technology Books – July 2000, ISBN: 0080437206.

**References**

1. Anoshkin A.N., Zuyko A.N., Shipunov G.S., Tretyakov A.A., Tekhnologii i zadachi mekhaniki kompozitsionnykh materialov dlya sozdaniya lopatki spryamlayushego apparata

aviatsionnogo dvigatelya. Vestnik PNIPU. Mekhanika. 2014 no. 4, pp. 5–44.

2. Vakhromeev A.M., Mashiny dlya ispytaniy na ustalost. Moskovskiy avtomobilno-dorozhnyy institute (gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet). M., 2006. pp. 61.

3. Nikolaev E.V., Korenkova T.G., Shvedkova A.K., Val Levin E.O. Issledovanie vliyaniya temperaturnykh faktorov na process stareniya novikh polimernykh kompozitsionnykh materialov dlya motogondoly aviatsionnogo dvigatelya. Elektronnyy nauchnyy jurnal «TRUDY VIAM», FGUP «VIAM», no. 3, 2015, ISSN 2307-6046.

4. Stepanov V.A., Peschanskaya N.N., Shpeizman V.V. Prochnost i relaksatsionnye yavleniya v tverdkh telakh. 1984. pp. 246.

5. Enciklopediya polimerov. M.: Sovetskaya enciklopediya, 1977. T. 3. 492 p.

6. ASTM D 3479. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA, 2012.

7. Apinis R. Acceleration of fatigue tests of polymer composite materials by using high-frequency loadings // Mechanics of Composite Materials, Vol. 40, no. 2, 2004. pp. 107–118.

8. Daggumati S., Baere I. De., Paepge W. Van, Degrieck J., Xu J., Lomov S.V., Verpoest I. Fatigue and post-fatigue stress-strain analysis of a 5-harness satin weave carbon fibre reinforced composite. Composites Science and Technology, v. 74 (2013). pp. 20–27.

9. Kondo K., Phillips D.C., Pipes R.B., Talreja R., Naslain R.. Comprehensive Composite Materials. Vol. 2: Polymer Matrix Composites. Elsevier Science & Technology Books – July 2000, ISBN: 0080437206.

**Рецензенты:**

Бульбович Р.В., д.т.н., профессор, декан факультета «Аэрокосмический», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь;

Колмогоров Г.Л., д.т.н., заведующий кафедрой «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь.