

**Малькова С.А.**АО «ОДК-Авиадвигатель»,  
Комсомольский проспект, д. 93,  
г. Пермь, 614990,  
Российская ФедерацияПермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет  
Комсомольский проспект, д. 29,  
г. Пермь, 614990,  
Российская Федерация[malkovasofia@myrambler.ru](mailto:malkovasofia@myrambler.ru)**Уткин А.О.  
Торопицина А.В.**АО «ОДК-Авиадвигатель»,  
Комсомольский проспект, д. 93,  
г. Пермь, 614990,  
Российская Федерация**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ  
КОНСТРУКТИВНО ПОДОБНОГО ОБРАЗЦА ИЗ  
ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО  
МАТЕРИАЛА**

*В данной работе выполнена оценка усталостной прочности конструктивно подобного образца из полимерного композитного материала (ПКМ). Проведены усталостные испытания конструктивно подобных образцов из ПКМ с применением электродинамического вибростенда. По результатам испытаний построена кривая усталости. Разработана расчётная модель конструктивно подобного образца с учётом конструктивных особенностей и закрепления образца в оснастке при испытаниях. В дальнейшем планируется использование полученной расчётной модели для исследования конструктивно подобного образца с расслоением, полученным в ходе испытаний, и перенос результатов на полноразмерную модель.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы; усталостные испытания; кривая усталости; предел выносливости; расслоение; метод конечных элементов

**1 Введение**

При проектировании элементов конструкции самолётов в последние годы применяются композиционные материалы, обладающие высокой прочностью при низкой плотности, высокими усталостными характеристиками, высокой устойчивостью к коррозии и износостойкостью.

Благодаря уникальным характеристикам композиционные материалы пользуются большой популярностью для использования в нагруженных элементах самолётов (мотогондола, крыло, обшивки, фюзеляж и т.д.) [1–2].

Прогноз ресурса несущей способности деталей и узлов из полимерных композиционных материалов имеет большое практическое значение [3–4].

При обосновании усталостной прочности конструкции из полимерных композиционных материалов согласно требованиям [5] необходимо показать, что разработанная конструкция обладает достаточной прочностью, чтобы выдерживать нагрузки типового профиля полёта, вибрационные и акустические нагрузки [6].

Особенностью оценки усталостной прочности полимерных композиционных материалов является сложный характер развития дефектов и повреждений до исчерпания несущей способности детали или узла в связи с его неоднородной и анизотропной структурой [7].

Для оценки усталостной прочности деталей и узлов из ПКМ проводятся усталостные испытания для получения S-N кривой. В связи с тем, что детали и узлы, изготавливаемые из полимерных композитных материалов, обладают несовершенствами (непроклеи, внутренние напряжения, пористость и т.д.), усложняется прогнозирование усталостного разрушения детали по испытаниям стандартных образцов. Необходимо проведение оценки усталостной прочности таких деталей с учётом несовершенств.

Для подтверждения усталостной прочности деталей и узлов из полимерных композиционных материалов применяется расчётно-экспериментальный способ с использованием результатов испытаний конструктивно подобных образцов. Данный метод позволяет сократить длительность и

стоимость прямых испытаний полноразмерной конструкции [7].

## 2 Экспериментальная оценка усталостной прочности образца

Образцы конструктивно подобных элементов (КПЭ) повторяют геометрию наиболее нагруженных критических зон деталей [8]. В таком случае к образцам предъявляют требования, по которым они должны быть изготовлены по близкой технологии изготовления детали. Таким образом, образцы могут иметь вид отгибных фланцев, ламинатных элементов с отверстиями, элементов сотовых конструкций и пр.

По результатам усталостных циклических испытаний конструктивно подобных образцов получают кривые усталости и условный предел выносливости.

Методика проведения усталостных испытаний предполагает циклическое приложение нагрузки, изменяемой по синусоидальному закону с постоянной амплитудой. Закрепление конструктивно подобного образца в оснастке испытательной машины и место приложения нагрузки выбираются таким образом, чтобы напряжённо-деформированное состояние в условиях испытаний соответствовало напряжённо-деформированному состоянию детали в условиях эксплуатации [6]. Для контроля распределения деформаций при испытаниях образец препарируют тензорезисторами.

В качестве нагружающего устройства, как правило, применяют электродинамический вибростенд, совершающий гармонические колебания вибростола (рисунок 1). Одним из основных требований, предъявляемых к таким испытаниям, является низкая резонансная частота колебаний образца, чтобы не допустить саморазогрева материала [9].

В работе рассмотрены испытания на усталость при циклическом нагружении по схеме изгиба консольной балки.

В процессе испытаний система измерений, входящая в систему управления виб-

ростендом, контролирует следующие параметры: амплитуда нагружения, частота колебаний и количество циклов нагружения. Для построения кривой усталости испытания проводятся при различном уровне нагрузки.



Рисунок 1. Схема испытаний образца на вибростенде

В процессе испытаний образца при высоких нагрузках довольно хорошо фиксируется развитие трещины и разрушение при малом числе циклов. Критерием разрушения образца является существенное образование трещин и расслоений, которые могут привести к потере несущей способности. В ходе испытаний в образцах зафиксировано развитие трещин (рисунок 2).



Рисунок 2. Вид трещины на конструктивно подобном образце композитного фланца

По результатам усталостных испытаний образцов из ПКМ построена кривая усталости, представленная на рисунке 3.

В ходе испытаний было отмечено, что при постепенном развитии трещины наблюдалось медленное снижение резонансной частоты. При резком увеличении тре-

щины происходит скачкообразное падение частоты.

Полученные экспериментальные данные планируется использовать при оценке прочности композитной конструкции при усталостных и вибрационных нагрузках.

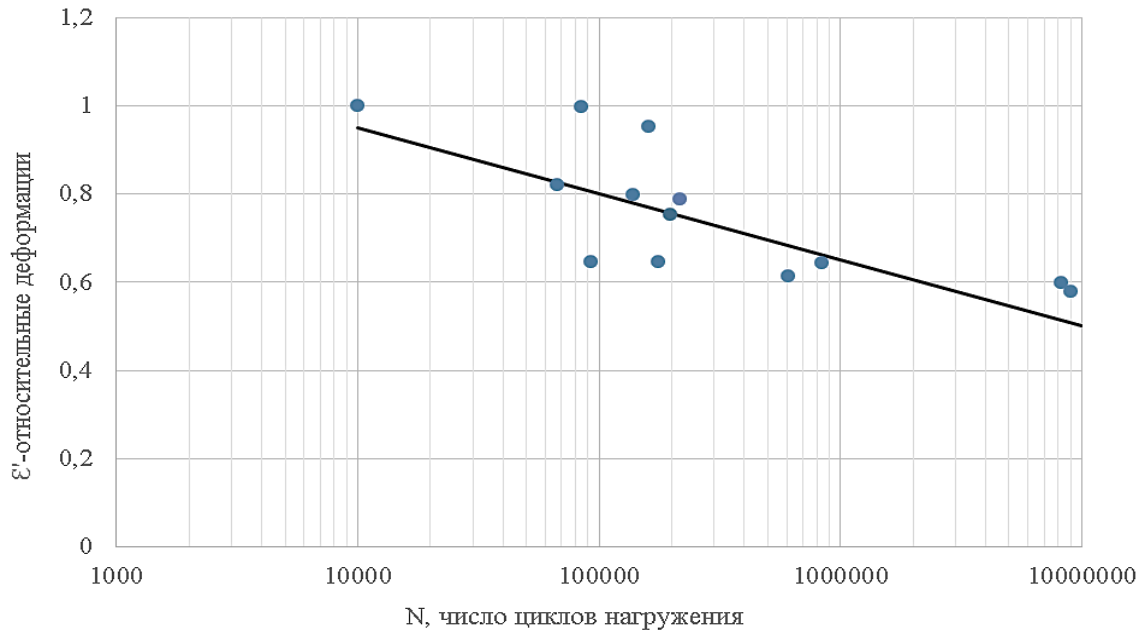


Рисунок 3. Кривая усталости образца, где  $\epsilon' = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_{max}}$  – относительная деформация,  $\epsilon_a$  – амплитуда деформации по тензорезистору,  $\epsilon_{max}$  – максимальная амплитуда деформации, N – число циклов нагружения

### 3 Расчётное определение усталостной прочности образцов композитных фланцев

Для оценки усталостной прочности полноразмерной конструкции планируется перенос результатов усталостных испытаний конструктивно подобных образцов на расчётную модель полноразмерной конструкции. С этой целью проводится моделирование методом конечных элементов конструктивно подобных образцов и имитация усталостных испытаний.

На основе проведённых испытаний разработана конечно-элементная модель. Моделирование конструктивно подобного образца проводилось послойное, согласно конструкторской документации. Учитывались направление укладки, толщина слоёв,

характеристики композитных материалов и особенности геометрии. Сложная форма образца усложняет моделирование, в связи с этим были рассмотрены несколько вариантов построения модели.

Проведено сравнение результатов для оболочечных элементов и твёрдотельных элементов при моделировании конструктивно подобного образца (рисунки 4–5).

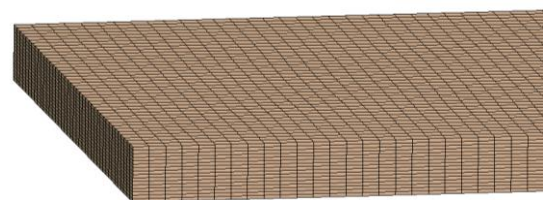


Рисунок 4. Твёрдотельная конечно-элементная модель после выкладки слоёв композита

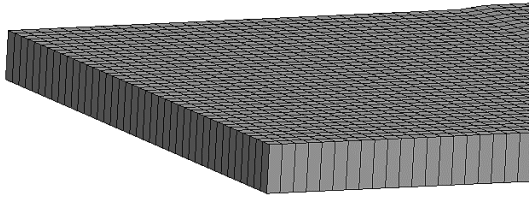


Рисунок 5. Оболочечная конечно-элементная модель после выкладки слоёв композита

Как видно из рисунков 4–5, при моделировании образца твёрдотельными элементами сетка строится для каждого смоделированного слоя, в то время как для оболочечных элементов сетка единая.

В связи с этим предпочтение было отдано твёрдотельной модели для облегчения получения картины распределения напряжений и деформаций в слоях образца.

Кроме конструктивно подобного образца была смоделирована оснастка. Было учтено место закрепления образца в оснастке, глубина посадки образца в оснастке.

Также учитывалось расположение грузов на образце согласно их расположению при проведении испытаний. Граничные условия – жёсткая заделка по основанию оснастки.

Проведён модальный анализ с целью получения первых собственных частот и форм колебаний конструктивно-подобного образца.

Первая форма колебаний образца соответствует изгибу консольной балки. Частота колебаний, соответствующая частоте колебаний образца при испытаниях, была получена с помощью добавления массы грузов к образцу. Для достижения необходимой частоты был добавлен груз для увеличения массы образца и снижения первой собственной частоты колебаний. Первая форма колебаний соответствует изгибу консольной балки и приведена на рисунке 6.

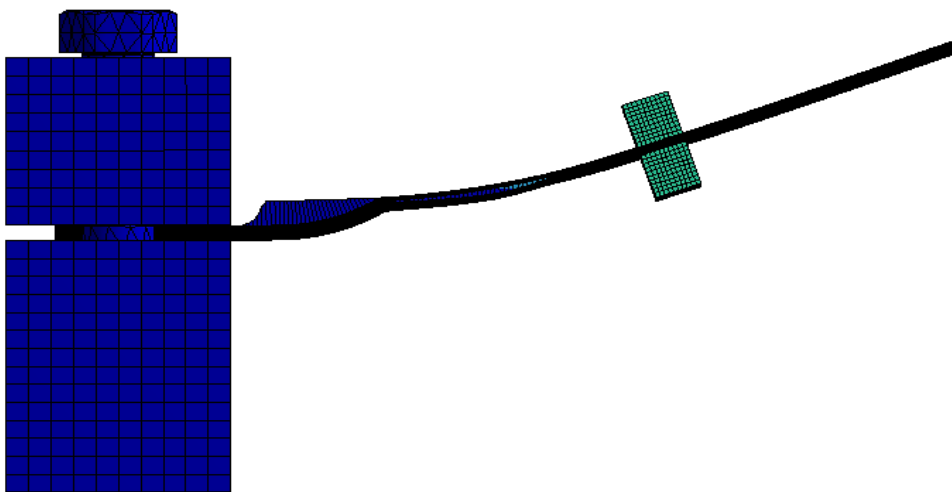


Рисунок 6. Первая форма колебаний конструктивно подобного образца фланца

Для оценки деформаций при нагружении образца синусоидальной нагрузкой проведён гармонический анализ. Амплитуда виброускорения прикладывалась к оснастке в месте закрепления при проведении модального анализа.

Для построения графика зависимости величины деформации от амплитуды нагружения значения амплитуды были вы-

браны с шагом в 0,5 g. Задан минимальный коэффициент демпфирования 0,01.

Значения деформации на расчётной модели были сняты в точках расположения датчиков деформации при испытаниях, в тех же координатах и в том же направлении.

В результате расчёта получена хорошая сходимость результатов расчётов с резуль-

татами испытаний при нагружении образца до 1,5g (рисунок 7). При бóльшей нагрузке отклонение значений на расчётной модели от результатов испытаний значительно больше. Есть предположение, что

отклонение результатов связано с недоработкой расчётной модели, которая не учитывает величину расслоения и фактический коэффициент демпфирования для каждого испытания.

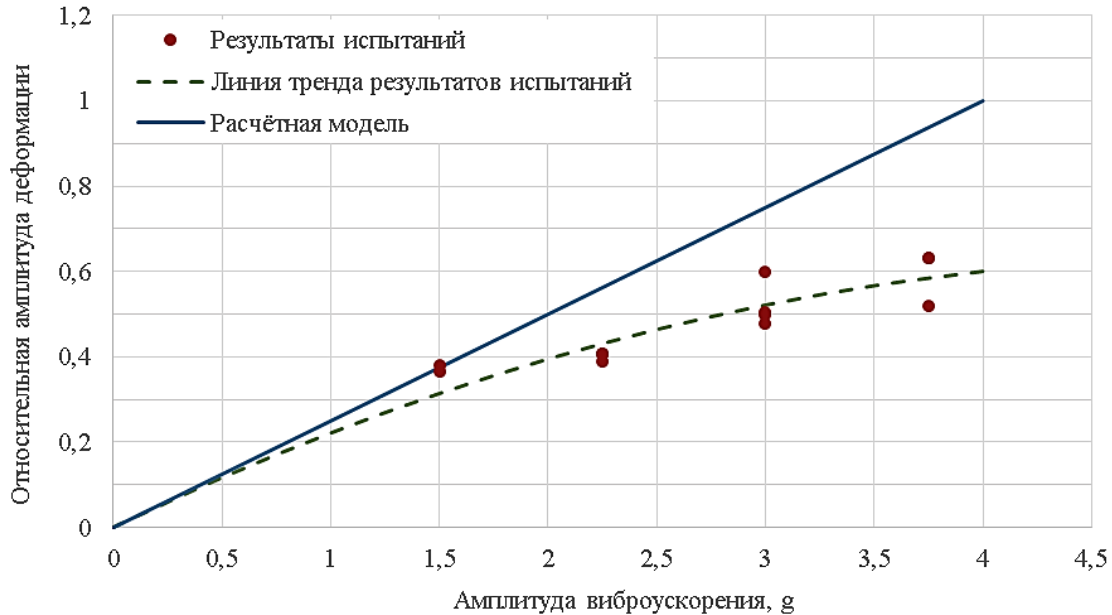


Рисунок 7. Верификация расчётной модели с результатами испытаний

#### 4 Заключение

В результате проделанной работы отработан экспериментальный подход в получении кривых усталости для конструктивно подобных образцов сложной формы. Определены требования к расчётным моделям и объём необходимых данных для дальнейшего развития расчётно-экспериментального подхода по оценке усталостной прочности.

В дальнейшем планируется использование полученной расчётной модели для исследования конструктивно подобного образца с расслоением, полученным в ходе испытаний, а также перенос результатов, полученных на конструктивно подобном образце, на полноразмерную модель детали.

#### Список использованных источников

[1] Миронов, Р.Д. Применение композиционных материалов в авиации / Р.Д. Миронов // Развитие

технических наук в современном мире. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. – 2014. – №1. – С.17-18.

[2] Малая, Е. В. Композиционные материалы в современной авиации / Е. В. Малая, А. И. Саввин // Актуальные исследования. – 2022. – № 49. – С. 6-9.

[3] Зиборов, Е. Н. Конечноэлементное моделирование усталостной прочности композитного материала / Е. Н. Зиборов, А. Н. Соловьёв // Advanced Engineering Research. – 2013. – № 5-6 (74). – С. 104-109. DOI: 10.12737/1287

[4] Paeppegem, W. van. Finite element approach for modelling fatigue damage in fibre-reinforced composite materials / W. van Paeppegem, J. Degrieck, P. De Baets // Composites. – 2001. – Part B – №32. – P. 575-588.

[5] Авиационные правила. Часть 25. изд.7 Нормы лётной годности самолётов транспортной категории // Межгосударственный авиационный комитет Авиационный регистр, 2022.

[6] Малькова, С. А. Экспериментальная оценка усталостной прочности конструктивно подобного образца фланца из полимерных композиционных материалов / С. А. Малькова, А. В. Торопицина, А. О. Уткин // Перспективы развития двигателестроения. Материалы докладов. – 2023. – Т.1. – С. 147-149.

[7] Каримбаев, Т. Д. Оценка усталостной долго-

вечности изделий из композиционных материалов / Т. Д. Каримбаев // *Авиационные двигатели.* – 2020. – № 4. – С. 75-93.

[8] Соломонов, Д. Г. Выбор конструктивно-подобных элементов для испытаний на усталость авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов / Д. Г. Соломонов, М. Ш. Нихамкин, А. В. Торопицина // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника.* – 2022. – № 69.

– С. 62-70. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.07

[9] Нихамкин, М.Ш. Тепловое состояние образцов из углепластика при усталостных испытаниях / М. Ш. Нихамкин, И. П. Конев, Н. А. Саженов, Д. А. Самодуров, А. В. Торопицина // *Фундаментальные исследования.* – 2015. – № 9 (часть 1). – С. 44-49.



**Malkova S.A. NUMERICAL SIMULATION OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A STRUCTURALLY SIMILAR SAMPLE FROM POLYMER COMPOSITE MATERIAL**

JSC «UEC-Aviadvigatel»  
93, Komsomolsky pr.,  
Perm, 614990,  
Russian Federation

Perm National Research Polytechnic  
University,  
29, Komsomolsky pr.,  
Perm, 614990,  
Russian Federation

[malkovasofia@myrambler.ru](mailto:malkovasofia@myrambler.ru)

**Utkin A.O.  
Toropitsina A.V.**

JSC «UEC-Aviadvigatel»  
93, Komsomolsky pr.,  
Perm, 614990,  
Russian Federation

*In this paper, the fatigue strength of a structural similar sample made of polymer composite material (PCM) is evaluated. Fatigue tests of structurally similar samples from PCM were carried out using an electrodynamic vibration stand. Based on the test results, a fatigue curve is constructed. A design model of a structurally similar sample has been developed, taking into account the design features and fixing the sample in the tooling during testing. In the future, it is planned to use the obtained computational model to study a structurally similar sample with a bundle obtained during testing and transfer the results to a full-size model.*

**Keywords:** *polymer composite materials; fatigue tests; fatigue curve; endurance limit; stratification; finite element method*

## References

- [1] Mironov, R. D. Primenenie kompozicionnyh materialov v aviacii // Razvitie tekhnicheskikh nauk v sovremennom mire [Development of technical sciences in the modern world] / R. D. Mironov // Razvitie tekhnicheskikh nauk v sovremennom mire. Sbornik nauchnyh trudov po itogam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Collection of scientific papers based on the results of the international scientific and practical conference]. – 2014. – №1. – P.17-18. (in Russian).
- [2] Malaya, E. V. Composite materials in modern aviation / E. V. Malaya, A. I. Savvin // Aktualnye issledovaniya. – 2022. – № 49. – P. 6-9. (in Russian).
- [3] Ziborov, E. N. Finite element modeling of composite material fatigue strength / E. N. Ziborov, A. N. Solov'yov // Advanced Engineering Research. – 2013. – № 5-6 (74). – P. 104-109. DOI: 10.12737/1287. (in Russian).
- [4] Paepegem, W. van. Finite element approach for modelling fatigue damage in fibre-reinforced composite materials / W. van Paepegem, J. Degrieck, P. De Baets // Composites. – 2001. – Part B – №32. – P. 575-588.
- [5] Aviacionnye pravila [Aviation Requirements]. Part 25. ed. №. 7 Normy lyotnoj godnosti samolyotov transportnoj kategorii [Airworthiness standards for transport category aircraft] // Mezhhgosudarstvennyj aviacionnyj komitet Aviacionnyj registr [Interstate Aviation Committee Aviation Register], 2022. (in Russian).
- [6] Mal'kova, S. A. Experimental evaluation of fatigue strength of a structurally similar flange sample made of polymer composite materials / S. A. Mal'kova, A. V. Toropicina, A. O. Utkin // Trends in engine development. Proceedings. – 2023. – T.1. – P. 147-149. (in Russian).
- [7] Karimbaev, T. D. Evaluation of fatigue life of products made of composite materials / T. D. Karimbaev // Aviation engines. – 2020. – № 4. – P. 75-93. (in Russian).
- [8] Solomonov, D. G. A choose of structurally-similar samples for fatigue testing of polymer composite aviation structures / D. G. Solomonov, M. Sh. Nihamkin, A. V. Toropicina // PNRPU Aerospace Engineering Bulletin. – 2022. – № 69. – P. 62-70. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.07. (in Russian).
- [9] Nihamkin, M.Sh. Thermal state of a carbon fiber specimen under fatigue test / M. Sh. Nihamkin, I. P. Konev, N. A. Sazhenkov, D. A. Samodurov, A. V. Toropicina // Fundamental research. – 2015. – № 9 (part 1). – P. 44-49. (in Russian).