

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

А.С. Липатов

lipatovas@student.bmstu.ru

SPIN-код: 3795-1662

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Одним из преимуществ композитов является то, что материал и конструкция создаются инженером одновременно. Это позволяет добиваться максимальной эффективности в использовании данного материала, но в то же время приводит к необходимости разработки новых подходов к оценке прочностной надежности материала в каждом конкретном его применении. Настоящая работа посвящена исследованию прочности слоистых волокнистых композиционных материалов, применяемых, в частности, для лопаток вентиляторов авиационных двигателей. С этой целью проведен виртуальный эксперимент, позволяющий оптимизировать макроструктуру материала. Преимуществом такого подхода является получение достоверных сведений о прочности и надежности элементов конструкции без проведения дорогостоящих натуральных испытаний, на основе разработанной математической модели образца материала и виртуального эксперимента, с применением современных методов анализа прочности.

Ключевые слова

Прочность композитов, слоистые композиционные материалы, препреги, композитные материалы, критерий максимальных напряжений, испытание на растяжение, метод конечных элементов, ANSYS Workbench

Поступила в редакцию 15.02.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Для обеспечения экономичности, надежности и конкурентоспособности авиационных двигателей приходится решать различные технические задачи. Одним из основных путей решения совершенствования двигателей является использование композиционных материалов (КМ) [1].

Впервые композитные лопатки были разработаны компанией General Electric для вентилятора двигателя GE 90 Boeing 777 с целью замены пустотелых титановых лопаток. Такая замена наряду с другими достоинствами позволила снизить массу конструкции на 10 %. Затем композитные лопатки использовали и для других моделей Boeing 787 и 747-8. Продолжается также разработка композитных лопаток для применения в конструкциях других двигателей.

Использование рабочих лопаток из КМ в отечественных двигателях большой степени двухконтурности, в том числе в новых версиях ПД-14, является актуальной проблемой, так как позволяет добиваться улучшения характери-

стик двигателей. Увеличение размеров вентиляторов приводит к необходимости использовать конструкционные материалы с жесткими весовыми ограничениями и повышенными требованиями к надежности. Для решения этой проблемы в ЦИАМ им. П.И. Баранова создан комплекс современных методов проектирования изделий из композитов. Также существуют необходимые технологические разработки и оборудование для мелкосерийного производства рабочих лопаток вентиляторов, лабораторное и стендовое оборудование для прочностной доводки рабочих лопаток вентиляторов и выполнения квалификационных испытаний.

Квалификационные испытания материала лопатки проводятся по согласованной с Авиационным регистром Межгосударственного авиационного комитета программе. Наиболее важным этапом испытаний является испытание конструктивно-подобных образцов, а также двухзамковых образцов с хвостовиками, напряженно-деформированное состояние (НДС) которых соответствует хвостовикам рабочей лопатки (рис. 1). После такой проработки проводят стендовые испытания полноразмерной лопатки в условиях, приближенным к эксплуатационным [2, 3].

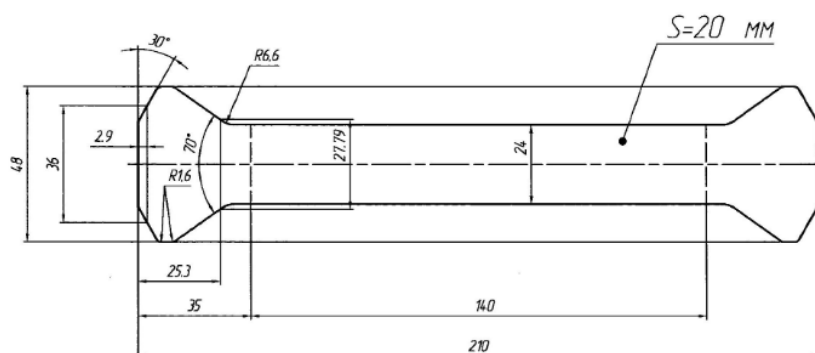


Рис. 1. Чертеж двухзамкового образца конструкции ЦИАМ

Данная статья также посвящена анализу прочности слоистых композитов. С этой целью построены диаграммы нагружения слоистых КМ при различных углах армирования. Важной частью этой работы стала оценка накопления повреждений с помощью виртуального эксперимента на модели слоистого волокнистого композиционного материала (ВКМ).

С этой целью была использована сплошная модель материала с твердотельным слоистым элементом Solid и послойным моделированием геометрии конечно-элементной (КЭ) сетки слоев. Это позволило установить, как зависит НДС образца от углов укладки слоев.

Постановка задачи. В ходе выполнения работы по изучению НДС слоистых ВКМ разработан образец, показанный на рис. 2, для испытания на растяжение, с оптимальной конфигурацией, размерами и однородным напряженным состоянием в рабочей части образца [4].

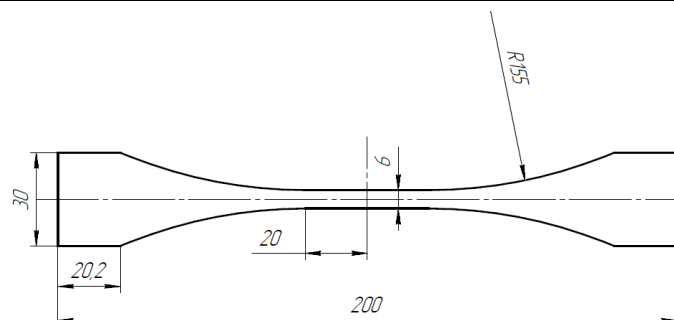


Рис. 2. Модель образца слоистого ВКМ

В качестве исследуемого материала образца был выбран углеродный препрег на связующем из эпоксидной смолы (Ероху Carbon UD (230 GPa) Prepreg), широко используемый в авиастроении [5, 6]. Механические характеристики данного материала приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики материала Ероху Carbon UD (230 GPa) Prepreg

Характеристика	Числовое значение	Единицы измерения
Плотность (ρ)	$1,49 \cdot 10^{-9}$	т/мм ³
Модуль упругости (E_1)	$1,21 \cdot 10^5$	МПа
Модули упругости ($E_2=E_3$)	8 600	МПа
Модули сдвига ($G_{12}=G_{31}$)	4 700	МПа
Модуль сдвига (G_{23})	3 100	МПа
Коэффициент Пуассона ($\nu_{12}=\nu_{13}$)	0,27	—
Коэффициент Пуассона (ν_{23})	0,40	—

Рассматриваемый образец состоит из восьми монослоев толщиной 0,1 мм, с симметричной, сбалансированной укладкой однонаправленных слоев — $[0/90]_{2S}$ и $[0/+45/-45/90]_S$ и испытывается на растяжение.

Проведение виртуальных экспериментов. Для построения диаграммы нагружения образца проведем серию виртуальных экспериментов в программном комплексе ANSYS Workbench 17.2. Для этого будем нагружать образец постепенно нарастающей растягивающей силой до его полного разрушения.

Анализ прочности образца из ВКМ будем проводить послойно с использованием метода конечных элементов (МКЭ) модуля ANSYS Composite PrePost (модуль, встраиваемый в ANSYS Workbench и предназначенный для моделирования элементов конструкций из композитных материалов), с использованием структурно-феноменологического метода, описанного в работах [7–9]. Согласно этому методу, сначала получают усредненные физико-механические характеристики, а затем переходят к расчету конструкции с помощью математической модели; определяют распределение напряжений и деформаций в конструкции. Затем возможен переход от усредненных деформаций и напряжений к напря-

жениям и деформациям в каждом монослое КМ — с учетом его свойств, ориентации волокон, толщины и положения в пакете. На завершающем этапе на основании полученных значений с помощью выбранного критерия разрушения делают заключение о прочности монослоя.

Критерии, которые соответствуют структурно-феноменологическому подходу, выводятся на основе статистического обобщения данных, полученных экспериментально, и их последующего анализа. Данные критерии позволяют рассматривать прогрессирующее разрушение конструкции, когда на каждом этапе нагружения она ослабляется на один разрушенный слой.

В представленной работе в качестве критерия оценки прочности однонаправленного слоя при послойном анализе прочности используется наиболее простой из используемых в настоящее время критериев по максимальным предельным значениям напряжений, возникающих в анализируемом слое КМ. Преимущество данного критерия заключается в простоте анализа прочности конструкции и математических вычислений, а также в возможности оценки коэффициента запаса и прочности.

Критерии разрушения представлены в виде математического выражения, которое называют функцией критерия разрушения f . Значение данной функции равно обратному коэффициенту запаса прочности, т. е. значения меньше единицы — допустимые, а больше — недопустимые. При использовании данного критерия функцию разрушения записывают в следующем виде:

$$\left(\left| \frac{\sigma_1}{X} \right|, \left| \frac{\sigma_2}{Y} \right|, \left| \frac{\sigma_3}{Z} \right|, \left| \frac{\tau_{12}}{S} \right|, \left| \frac{\tau_{13}}{R} \right|, \left| \frac{\tau_{23}}{Q} \right| \right)_{\max} \leq 1,$$

причем

$$\begin{aligned} \sigma_1 \geq 0 &\rightarrow X = X_t; & \sigma_1 < 0 &\rightarrow X = X_c; \\ \sigma_2 \geq 0 &\rightarrow Y = Y_t; & \sigma_2 < 0 &\rightarrow Y = Y_c; \\ \sigma_3 \geq 0 &\rightarrow Z = Z_t; & \sigma_3 < 0 &\rightarrow Z = Z_c, \end{aligned}$$

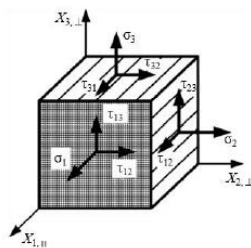


Рис. 3. Общий случай напряженного состояния материала

где $X_{t/c}$ — предел прочности при растяжении/сжатии по оси x (аналогично обозначены пределы прочности для других осей); Q, R, S — предельные сдвиговые напряжения в плоскостях с нормальными в направлениях 1, 2, 3 соответственно (рис. 3).

Для плосконапряженного состояния рассматривают только компоненты $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$.

Для оценки прочности композитов в ANSYS используют два основных параметра:

- 1) Reserve Factors (RF) — показывает, во сколько раз допускаемые напряжения превышают действующие;
- 2) Inverse Reserve Factors (IRF) — показывает, во сколько раз действующие напряжения меньше допускаемых.

В обоих случаях разрушение имеет место при $RF = 1$ или $IRF = 1$.

Показателем накопления повреждений является падение жесткости образца, а косвенной количественной оценкой может служить уменьшение площади поперечного сечения образца. Начальный модуль упругости, который был определен ранее, характеризует жесткость материала в начальный момент, а текущее значение модуля упругости пропорционально накопленному уровню повреждений.

Постепенное разрушение слоев образца моделировали с помощью команды EKILL. Данная команда деактивирует указанный элемент, когда используется функция рождения и смерти элемента. Деактивированный элемент остается в модели, но вносит почти нулевую жесткость (или проводимость и т. д.) в значение (ESTIF) для общей матрицы. Любые переменные состояния, зависящие от решения (например, напряжение, пластическая деформация, деформация ползучести и т. д.) устанавливаются равными нулю. В то же время деактивированные элементы не вносят никакого вклада в общую массу (или емкость и др.) матрицы, и не генерируют вектор нагрузки (давления, конвекции, гравитацию и т. д.) [10].

Алгоритм расчета состоял в следующем:

- 1) задают начальное приращение нагрузки ΔN ;
- 2) проводят расчет;
- 3) по результатам расчета проверяют для каждого элемента выполнение условия $IRF < 1$, если оно не выполняется, то данный элемент деактивируется с помощью команды EKILL на следующем этапе нагружения;
- 4) переходят к следующему этапу нагружения $N = N + \Delta N$.

При выходе повреждений слоя за границы образца происходит полное разрушение слоя.

Полное разрушение слоя моделируется с помощью уменьшения значений констант упругости E и G в 50 раз для конкретного слоя. Заметим, что полное обнуление значений E и G невозможно, поскольку матрица упругости становится плохо обусловленной и дальнейшее решение МКЭ становится неосуществимо.

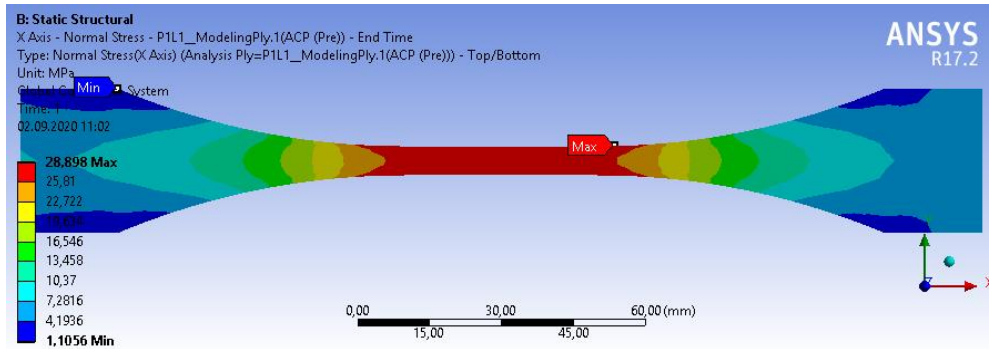
На рис. 4 представлен фрагмент программного кода, написанного на языке APDL (ANSYS Parametric Design Language), для деактивации конечных элементов образца.

На рис. 5 проиллюстрировано, как выглядит последовательный процесс деградации слоя КМ с поперечной ориентацией волокон на картах нормальных растягивающих напряжений σ_x , построенных в конечно-элементном программном комплексе ANSYS Workbench.

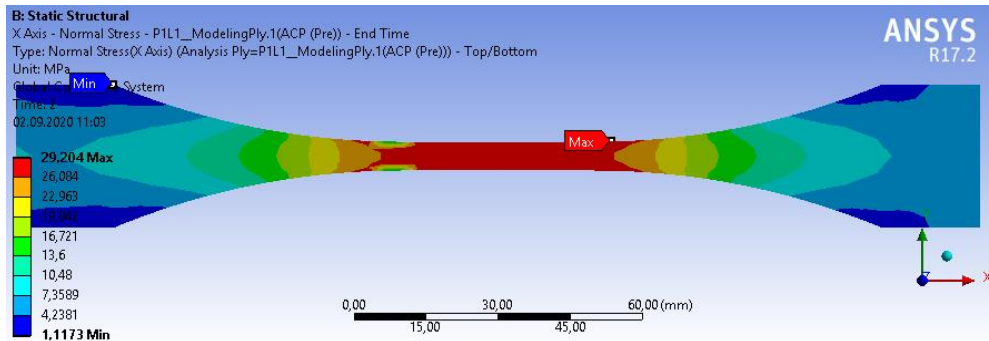
```
ESEL,S,ELEM,,1138,1138
EKILL,ALL
ESEL,ALL
ESEL,S,ELEM,,1143,1143
EKILL,ALL
ESEL,ALL
ESEL,S,ELEM,,1146,1146
EKILL,ALL
ESEL,ALL ...
```

Рис. 4. Фрагмент программного кода на языке APDL:

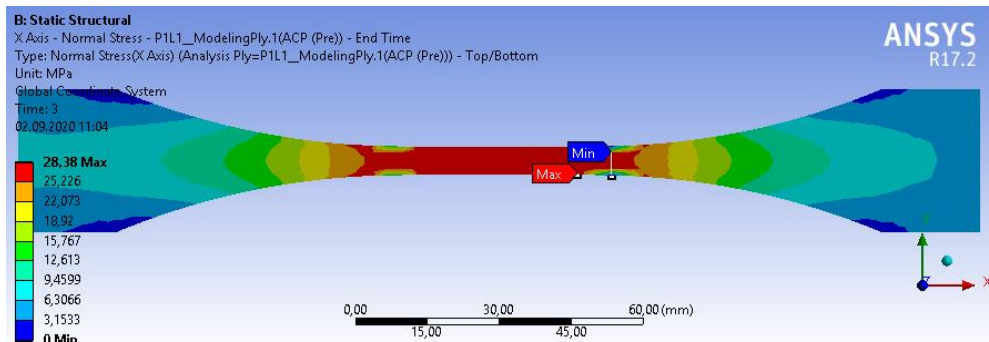
ESEL — команда выбора элементов, EKILL — команда деактивации выбранных элементов



a



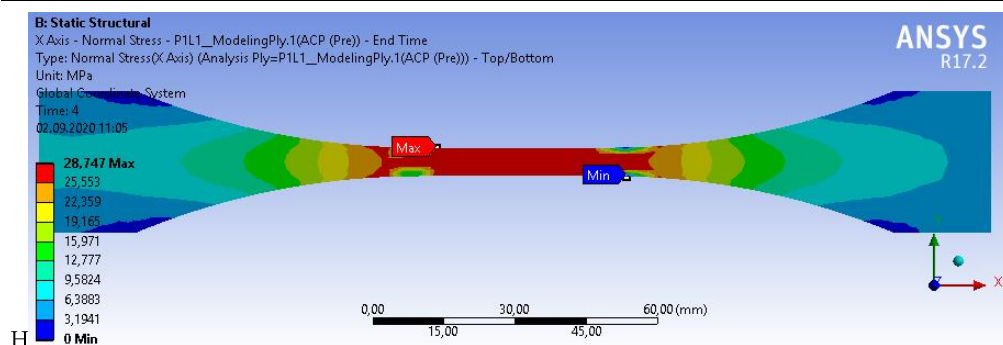
б



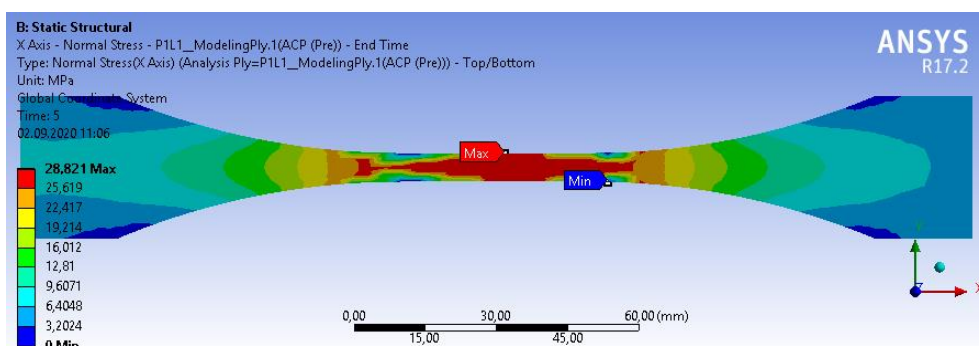
в

Рис. 5. Нормальные напряжения σ_x в первом слое с углом армирования 90° для первого образца с укладкой $[0/90]_{2S}$:

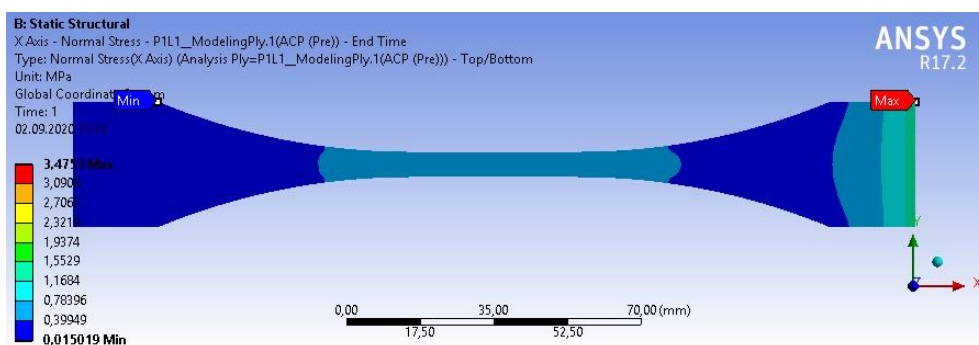
a — при нагрузке в 990 Н (до начала разрушения); б — при нагрузке в 1000 Н;
 в — при нагрузке в 1010 Н



2



δ



e

Рис. 5. Нормальные напряжения σ_x в первом слое с углом армирования 90° для первого образца с укладкой $[0/90]_{2S}$:

2 — при нагрузке в 1020; δ — при нагрузке в 1030 Н (δ — в процессе разрушения);
e — при нагрузке в 1040 Н (разрушившийся слой)

Диаграммы нагружения образцов из ВКМ. В результате поставленных виртуальных экспериментов с помощью программной системы ANSYS Workbench и математического пакета MATHCAD 15 были построены диаграммы

нагрузки ВКМ для образцов с различной укладкой слоев, представленные на рис. 6 и 7.

Данные результаты представлены для центральной точки образца. Поскольку задача симметрична, рассматривали половину слоев, т. е. 4 из 8 с нормалью z+.

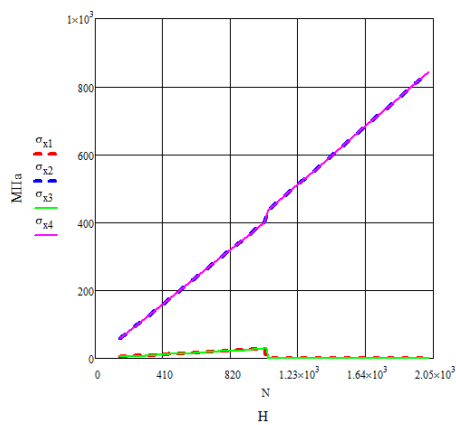
Для первого образца (с укладкой $[0/90]_{2S}$) первый и третий — слои КМ с углом армирования 90° , второй и четвертый — слои КМ с углом армирования 0° .

Для второго образца (с укладкой $[0/+45/-45/90]_S$) первый слой армирован под углом 90° , второй — под углом -45° , третий — под углом $+45^\circ$, а четвертый — под углом 0° .

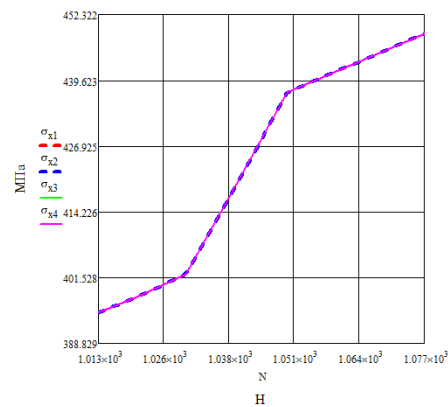
На основе полученных диаграмм можно сделать выводы:

– диаграммы нагружения КМ для образцов с укладками $[0/90]_{2S}$ и $[0/+45/-45/90]_S$ линейны, но имеют скачок напряжений, связанный с разрушением слоев и перераспределением напряжений между слоями ВКМ;

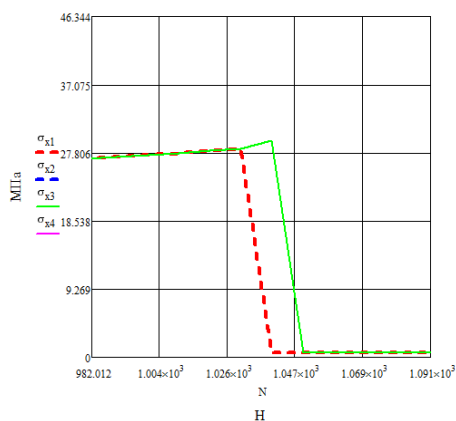
– несущая способность образца с укладкой $[0/90]_{2S}$ примерно в 1,4 раза выше, чем у образца с укладкой $[0/+45/-45/90]_S$.



a



б



в

Рис. 6. Зависимость нормальных напряжений σ_x от растягивающей силы (послойно) для укладки $[0/90]_{2S}$:

a — исходный график; *б, в* — увеличенные изображения отдельных участков графика *a*

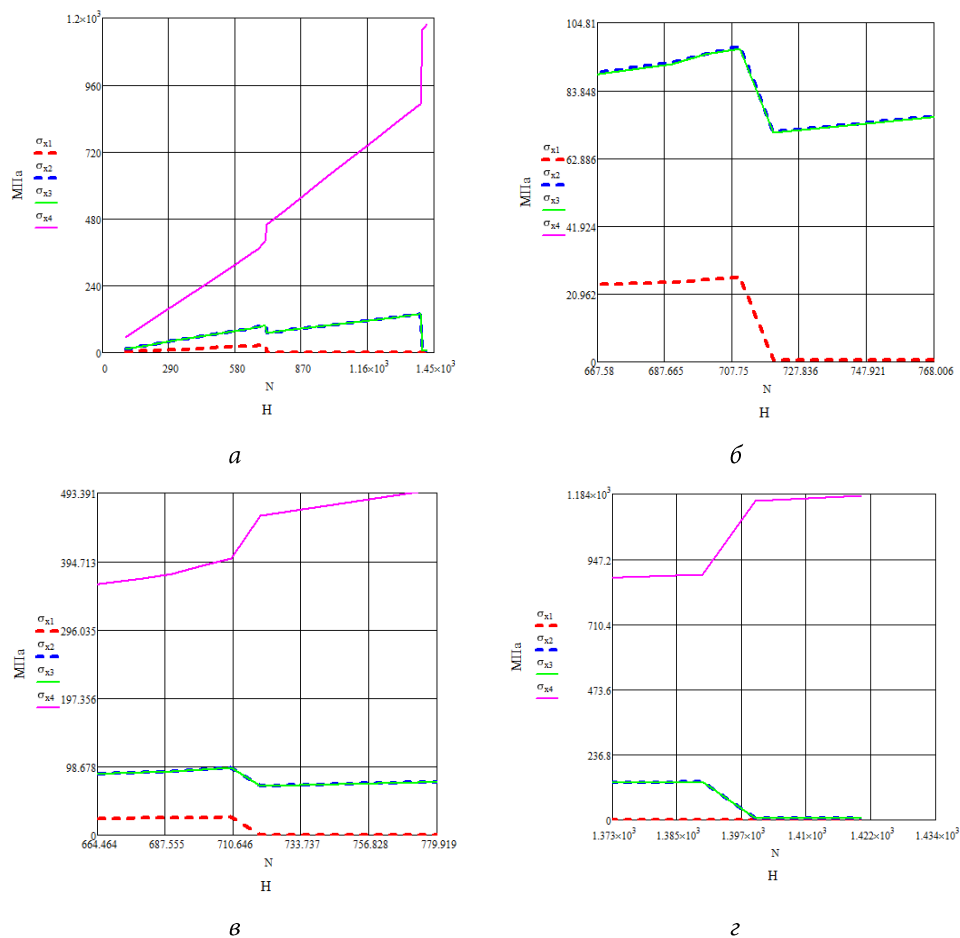


Рис. 7. Зависимость нормальных напряжений σ_x от растягивающей силы (послойно) для укладки $[0/+45/-45/90]_s$

a — исходный график; $б$ — $г$ — увеличенные изображения отдельных участков графика a

Заключение. В результате работы были построены диаграммы нагружения ВКМ при растягивающей нагрузке для образцов с разными пакетами укладок. Диаграммы получены с помощью виртуальных испытаний в конечно-элементном пакете ANSYS Workbench. Используемые образцы моделируют НДС, которое может возникать в лопатках авиационного двигателя. Разработка математических моделей поведения материала позволяет в ряде случаев отказаться от длительных и дорогостоящих стендовых испытаний.

Литература

- [1] Каримбаев Т.Д. Создание деталей и узлов авиационных двигателей с применением композиционных материалов на основе инновационных решений. *Вестник УГАТУ*, 2019, т. 23, № 2, с. 33–43.
- [2] Новиков А.С., Каримбаев Т.Д., Луппов А.А. и др. Инновации при применении композиционных материалов в авиационных двигателях. *Двигатель*, 2015, № 2, с. 6–9.

- [3] Новиков А.С., Каримбаев Т.Д. Рабочие лопатки вентиляторов большой степени двухконтурности для перспективных ТРДД. *Двигатель*, 2015, № 5, с. 6–11.
- [4] Липатов А.С. Исследование прочности слоистых композиционных материалов с концентраторами напряжений в виде выточек. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 8. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-8-633>
- [5] Нелюб В.А. Технологии получения препрегов. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2013, № 3, с. 12–17.
- [6] Мишкин С.И., Малаховский С.С. Быстроотверждаемые связующие и препреги: получение, свойства и области применения (обзор). *Труды ВИАМ*, 2019, № 5. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-32-40>
- [7] Гриневич Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор). *Труды ВИАМ*, 2019, № 7. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111>
- [8] Скворцов Ю.В. Механика композиционных материалов. Самара, СГАУ, 2013.
- [9] Орешко Е.И., Ерасов В.С., Гриневич Д.В. и др. Обзор критериев прочности материалов. *Труды ВИАМ*, 2019, № 9. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126>
- [10] ANSYS Documentation. Release 17.2. ANSYS, Inc., 2016.

Липатов Александр Сергеевич — магистрант кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Панова Ирина Михайловна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Липатов А.С. Анализ прочности элементов конструкций из слоистых композитов. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 03(56). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-03-683>

STRENGTH ANALYSIS OF STRUCTURAL ELEMENTS MADE OF LAMINATED COMPOSITES

A.S. Lipatov

lipatovas@student.bmstu.ru
SPIN-code: 3795-1662

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

One of the advantages of composites is that an engineer creates the material and structure at the same time. This makes it possible to achieve maximum efficiency in the use of material, but at the same time leads to the need to develop new approaches to assessing the strength reliability of the material in each specific application. This work is devoted to the study of the strength of layered fibrous composite materials used, in particular, for fan blades of aircraft engines. For this purpose, a virtual experiment was carried out to optimize the macrostructure of the material. The advantage of this approach is obtaining reliable information about the strength and reliability of structural elements without costly field tests, based on a developed mathematical model of a material sample and a virtual experiment, using modern methods of strength analysis.

Keywords

Strength of composites, laminated composites, prepregs, composites, maximum stress criterion, tensile testing, finite element method, ANSYS Workbench

Received 15.02.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Karimbaev T.D. The creation of aircraft engines parts and components using composite materials based on innovative solutions. *Vestnik UGATU* [Vestnik USATU], 2019, vol. 23, no. 2, pp. 33–43 (in Russ.).
- [2] Novikov A.S., Karimbaev T.D., Luppov A.A., et al. Innovations at usage of composites in aviation engines. *Dvigatel'*, 2015, no. 2, pp. 6–9 (in Russ.).
- [3] Novikov A.S., Karimbaev T.D. High-bypass rotor blades for prospective bypass turbofan engines. *Dvigatel'*, 2015, no. 5, pp. 6–11 (in Russ.).
- [4] Lipatov A.S. Study of the strength of laminated composite materials with stress concentrators in the form of grooves. *Politekhnikeskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 8. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-8-633> (in Russ.).
- [5] Nelyub V.A. Technology of prepreg production. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2013, no. 3, pp. 12–17 (in Russ.).
- [6] Mishkin S.I., Malakhovskiy S.S. Fast curing resins and prepregs: receiving, properties and areas of application (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2019, no. 5. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-32-40> (in Russ.).
- [7] Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V. The criteria of the failure of polymer matrix composites (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2019, no. 7. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111> (in Russ.).
- [8] Skvortsov Yu.V. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composites]. Samara, SGAU, 2013 (in Russ.).

- [9] Oreshko E.I., Erasov V.S., Grinevich D.V., et al. Review of criteria of durability of materials. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2019, no. 9. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126> (in Russ.).
- [10] ANSYS Documentation. Release 17.2. ANSYS, Inc., 2016.

Lipatov A.S. — Master's Degree Student, Department of Machine Design Principles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Panova I.M., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Machine Design Principles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Lipatov A.S. Strength analysis of structural elements made of laminated composites. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 03(56). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-03-683.html> (in Russ.).