УДК 678.027

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОУШИН ИЗ АНИЗОТРОПНОГО КОРОТКОАРМИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

© 2017 Е.И. Куркин, В.О. Садыкова, М.О. Спирина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 13.12.2017

напряженно-деформированного Проведено исследование состояния проушин ИЗ короткоармированного композиционного материала РЕЕК 90HMF20. Рассмотрен вопрос моделирования анизотропии механических характеристик изделий с учетом направления армируюших волокон. Рассмотрено два размера проушин. В программном комплексе Moldex 3D произведен расчет литья пластины и определена ориентация волокон. В модуле Digimat MAP построена модель переноса информации об ориентации волокон при вырезке проушин из пластины заготовки. Полученный тензор ориентации использован при построении многоуровневой модели материала в системе Digimat. Расчет напряженно-деформированного состояния проушин выполнен в программном комплексе Ansys Workbench. Для каждого размера проушин были определены поля модуля перемещений и эквивалентных напряжений, а также оценена овализация отверстия. Построены зависимости овализации отверстия проушины от силы ее растяжения для каждого размера проушин. Проведено сравнение жесткости проушин, вырезанных вдоль и поперек направления литья пластины – заготовки.

Ключевые слова: композиционный материал, проушина, короткие волокна, напряженнодеформированное состояние

> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60093 мол_а_дк.

1. ВВЕДЕНИЕ

Термопластичные композиционные материалы, армированные короткими высокопрочными волокнами, обладают высокой удельной прочностью. При плотности 1,4 гр/см³ они могут выдерживать нагрузки порядка 300 МПа. Поэтому, в силу высоких механических характеристик, из таких материалов возможно изготовление широкой номенклатуры изделий ответственных высоконагруженных элементов авиационных конструкций. Применение армированных композиционных материалов более подробно описано в [1].

В данной статье рассматривается термопластичный композиционный материал PEEK 90HMF20 [2], армированный короткими угольными волокнами. Данный материал обладает высокими механическими характеристиками и сочетает весовую эффективность с возможностью работы при высоких температурах и устойчивость к воздействию химически агрессивных сред. В настоящее время данный материал находит применение в авиационной и космической промышленности [3, 4]. Особые преимущества армированных короткими волокнами в хаотичном порядке композиционных материалов заключаются в возможности получения сложных пространственно - нагруженных узлов, которые невозможно изготовить из слоистых композиционных материалов в следствии низкой прочности при их расслоении. Жесткость и прочность рассматриваемого материала сильно зависит от ориентации волокон в изделии. Поэтому важным является обеспечение управления течением расплава и, в следствии этого, расположением волокон в таких материалах [5]. Сравнение данных, получаемых в программных комплексах, моделирующих литье, с экспериментальными данными показывают хорошую сходимость [6]. Применение технологии литья под давлением позволяет добиться заданных механических характеристик изделия в требуемых направлениях. Благодаря этому свойству изготовленные из таких материалов узлы совмещают в себе преимущества металлов не подверженных расслоению и высокую весовую эффективность. Для оценки напряженно-деформированного состояния таких изделий строится многоуровневая модель материала, учитывающая его анизотропию [7]. В качестве объекта исследования в статье рассмотрены проушины, которые являются одним из типовых и ответ-

Куркин Евгений Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru Садыкова Владислава Олеговна, студентка института авиационной техники. E-mail: vladislaava.s@yandex.ru Спирина Мария Олеговна, студентка института авиационной техники. E-mail: maryspirina@gmail.com

ственных элементов стыковочных узлов аэрокосмических конструкций, обладающих целым рядом нежелательных особенностей в характере напряженно-деформированного состояния.

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния проушин из короткоармированного материала с учетом анизотропии.

В данной работе для точного прогнозирования механических характеристик проушин проведено поэтапное моделирование:

1. Моделирование литья пластины, из которой вырезаются проушины, в программном комплексе Moldex 3D.

2. Расчет ориентации волокон на пластине в программном комплексе Moldex 3D.

3. Перенос ориентации волокон с пластины на проушины в месте их вырезки с помощью модуля Digimat Map.

4. Создание модели анизотропного материала в программном комплексе Digimat.

5. Расчет напряженно-деформированного состояния проушин с учетом ориентации воло-кон в программном комплексе ANSYS

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЬЯ ПЛАСТИНЫ И РАСЧЕТ ОРИЕНТАЦИИ ВОЛОКОН

Для прогнозирования характеристик армирования проводилось моделирование литьевого процесса пластины с размерами 150х200х3,7 мм. Для этого была создана расчетная сетка пластины и литниковой области в Rhinoceros, а также каждой из сеток присвоен свой атрибут (рис. 1). Данная программа позволяет создать структурированную сетку с пограничным слоем, задать систему охлаждения и выбрать область литья Mold Base. Количество элементов в сетке составило 2622420, сетка состоит из 20 слоев, размеры ячейки 0,5х0,2 мм.

Моделирование литья пластины под давлением проводилось в программном комплексе Moldex3D. При использовании технологии литья важную роль играет вязкость материала. Moldex3D имеет обширный банк материалов, среди которых есть РЕЕК 90HMF40. Используя характеристики разработчиков [2,8] модель материала была изменена для РЕЕК 90HMF20. Данный материал имеет в 1,7 раз меньшее значение вязкости. На рис. 2 представлена зависимость



Рис. 1. Конечно-элементная модель пластины и литниковой области



a) PEEK 90HMF40, 6) PEEK 90HMF20

Температура расплава, °С	400
Температура формы, °С	220
Максимальное инжекционное	150
давление, МПа	
Объем впрыска материала, см ³	184

Таблица 1. Основные технологические параметры

вязкости от скорости сдвига для PEEK 90HMF20 и PEEK 90HMF40.

Технологические параметры процесса литья [9] заданы с использованием параметров литьевой машины Negro Bossi VE 210-1700. Основные технологические параметры представлены в табл. 1.

Полученный фронт литья пластины представлен на рис. 3.



Рис. 3. Фронт литья пластины из РЕЕК 90HMF20, с

Moldex 3D позволяет рассчитать ориентацию волокон в изделии. На рис. 4 представлена ориентация волокон по слоям.

В результате моделирования получается файл, содержащий информацию о направленности волокон внутри изделия.

3. ПЕРЕНОС ОРИЕНТАЦИИ ВОЛОКОН С ПЛАСТИНЫ НА ПРОУШИНЫ

Рассмотрено два размера проушин: размер «М» с размерами 80х38х3,7 мм и размер «S» с размерами 80х24х3,7 мм, диаметр отверстия проушин составляет 12 мм. В соединениях с проушинами присутствует контактное взаимодействие с цилиндрическим телом, обычно металлическим, имеют место контактные напряжения. Напряженное состояние элемента имеет большие градиенты. При использовании технологии литья и армированного материала важным является место вырезки проушин. Были рассмотрены проушины с разным расположением на пластине. Раскрой проушин представлен на рис. 5.

С помощью модуля Digimat MAP произведена выборка и сохранение информации об ориентации волокон в месте вырезки проушины (рис. 6).

4. СОЗДАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА

Анизотропный характер используемого материала PEEK 90HMF20 предполагает использование многоуровневого подхода к процессу его моделирования. Построение модели материала было реализовано в программном комплексе Digimat, в котором возможно аналитическое прогнозирование нелинейного поведения материалов [7].



Рис. 4. Проекции единичного вектора ориентации волокон на ось, расположенную вдоль литья: а) нижний слой, б) средний слой, в) верхний слой



Рис. 5. Геометрические характеристики проушин и раскрой пластины

В модуле Digimat-MF многоуровневая модель материала, зависящая от микроструктуры, была создана на основе параметров компонентов композита, исходя из паспортных характеристик каждого компонента. Применена концепция ячейки представительного объема, позволяющая осуществлять переход между уровнями одним из методов гомогенизации, а именно численно-аналитическим подходом гомогенизации по методу «среднего поля» [10].

Для удобства описания случайной ориентации волокон в матрице при заполнении пресс-формы вводится понятие тензоров ориентации. Для описания прочностных свойств использовался критерий Цая-Хилла для трансверсально-изотропных тел (3D), заданный на уровне композита, как показано на рисунке (рис. 7). Данный подход позволяет достоверно предсказывать разрушение конструкции при минимуме необходимых экспериментальных



Рис. 6. Значения компоненты тензора ориентации a11 проушины размера М: а) расположенной вертикально на пластине; б) расположенной горизонтально на пластине

исследований, поскольку критерий Цая-Хилла требует определение лишь трех предельных параметров: пределы прочности при растяжении в направлении армирования и в трансверсальном направлении, а также предел прочности при сдвиге [11].

Для прогнозирования прочности также использована модель первого разрушенного псевдо-зерна (FPGF) для армированных пластиков, когда разрушенное зерно исключается из расчета.

Для дальнейшего расчета полученный файл анализа материала передается в модуль Digimat-МХ, в котором проходит реверс-инжиниринг. Реверс-инжиниринг – итерационный процесс оптимизации, целью которого является поиск оптимальных значений, так называемых проектировочных переменных, то есть переменных, определяющих константы выбранного закона деформирования материала. Оптимальные значения проектировочных переменных минимизируют разницу между аналитической моделью Digimat-MF и экспериментальными данными, которые также добавлены в базу Digimat-MX в качестве тестового файла, содержащего значения напряжений и деформаций. Реверс-инжиниринг был выполнен по двум постановкам: по напряжениям и по деформациям. Результаты реверс-инжиниринга представлены на рис. 8.

Failure indicator definition				
Name: FailureIndicator1				
Model: Tsai-Hill 3D Transversely Isot	tropic 💌	Stress 💌	☑ Use linear formulation	
Axes system: local axes	•			
Failure indicator outputs				_
$f_i = \sqrt{\mathcal{F}_i(\boldsymbol{\sigma})}, \text{ with:}$				
$\mathcal{F}_A(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{\sigma_{11}^2}{X^2} - \frac{\sigma_{11}(\sigma_{22})}{X}$	$(+\sigma_{33}) + \frac{\sigma_{22}^2 + \sigma_{22}}{Y^2}$	$\frac{r_{33}^2}{X^2} + (\frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y})$	$\frac{2}{Y^2}\sigma_{33} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S^2} + (\frac{4}{Y^2} - \frac{1}{X^2})\sigma_{12}$	r_{23}^2

Рис. 7. Критерий Цая-Хилла (3D) в Digimat-MF



Рис. 8. Окно реверс-инжиниринга в модуле Digimat-MX

Оптимизированные свойства полимерной матрицы, то есть матрицы в составе композита отличаются от свойств той же матрицы в исходном состоянии. Результатом реверс-инжиниринга является модель материала, содержащая оптимизированные свойства компонентов композита, которая использована при расчёте напряженно-деформированного проушин с учетом анизотропии свойств перспективного композиционного материала.

5. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОУШИН

Моделирование прочностной модели осуществлялось в программном комплексе ANSYS. В DesignModeler подгружалась 3D-модель пластины, а также задавалась геометрическая модель оси, которая позволила корректно задавать нагружение. Ось представляет собой цилиндр, диаметр которого равен диаметру отверстия проушины 12 мм. Длина оси равна 9,7 мм. Конечно-элементная модель проушины с осью построена в ANSYS Mechanical и содержит 40980 конечных элемента и 180694 узла. Ось вставляется в проушину симметрично – расстояние от его торцов до соответствующих ближайших поверхностей проушины одинаковы. Для соединения оси и проушины используется односторонний контакт «без трения» (Frictionless). Заданы следующие граничные условия нагружения (рис. 9):

- торец проушины жестко заделан;

перемещение оси направлено вдоль оси проушины;

- условие жесткой заделки оставалось постоянным, в то время как перемещение болта было переменным.

В расчете задавался ряд значений перемещения оси для каждого размера проушин. Для каждого значения перемещения определялась сила растяжения проушины, поля эквивалентных напряжений и деформаций, а также овализацию отверстия.

Модуль перемещений проушины зависит от места закрепления (заделки) ее свободного конца, поэтому трудно проверяется экспериментально. Для того чтобы полученные результаты можно было сравнивать с экспериментом, хоро-

D₁ – длина отверстия в результате его дефор-

На рис. 10, 11, 1 2, 13 представлены поля эквивалентных напряжений и деформаций для проушины первого и второго размеров при расположении вертикально и горизонтально



Рис. 9. Конечно-элементная модель проушины и граничные условия

мации.

шо подходит величина овализации отверстия, которая вычисляется по формуле

$$\omega = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \cdot 100\%$$

где $D_0 = 12$ мм – исходный диаметр отверстия;



Рис. 10. Поля деформаций проушины размера «М», мм: а) при расположении проушины вертикально, б) при расположении проушины горизонтально



Рис. 11. Поля напряжений размера «М», МПа:

а) при расположении проушины вертикально, б) при расположении проушины горизонтально



Рис. 12. Поля перемещений проушины размера «S», мм: а) при расположении проушины вертикально, б) при расположении проушины горизонтально



Рис. 13. Поля эквивалентных напряжений размера «S», МПа: а) при расположении проушины вертикально, б) при расположении проушины горизонтально

на пластине. В качестве силы растяжения проушин было выбрано 3000 Н. При данной нагрузке сила от овализации имеет стабильный линейный характер.

На рис. 14 показаны рассчитанные зависимости силы растяжения проушин двух размеров от овализации отверстия при разном расположении на пластине.

6. ВЫВОДЫ

В статье проведена оценка напряженно-деформированного состояния проушин из короткоармировнного композиционного материала РЕЕК 90HMF20. Рассмотрено два размера проушин. Проведено моделирование литья пластины в Moldex3D, из которой вырезались проушины. В модуле Digimat MAP построена модель переноса информации об ориентации волокон



при вырезке проушин из пластины заготовки. Полученный тензор ориентации использован при построении многоуровневой модели материала в системе Digimat, учитывающей анизотропию его свойств. Расчет напряженно-деформированного состояния проушин выполнен в программном комплексе ANSYS Workbench. Для каждого размера проушин были определены овализация отверстия и поля модуля перемещений и эквивалентных напряжений. Жесткость проушин оценена построением полей перемещений и зависимостей овализации отверстия проушины от силы ее растяжения для каждого размера проушин. Проушины, располагающаяся вдоль направления литья вертикально на пластине обладают большей жесткостью, чем проушины того же размера, вырезанные поперек. Для проушины размера «М», расположенной вертикально на пластине, при силе растяжения проушины в 3 000 Н овализация составила 0,8%; а при расположении данной проушины горизонтально – 1,2%. Для проушины размера «S», расположенной вертикально на пластине, при силе растяжения проушины в 3 000 Н овализация составила 1,4%; а при расположении данной проушины горизонтально – 1,7%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Fu S-Y, Lauke B, Mai Y-W*. Science and engineering of short fibre reinforced polymer composites // Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2009. 364 c.
- Основные характеристики материала РЕЕК 90HMF20 фирмы Victrex [Электронный ресурс]. URL: https://www.victrex.com/~/media/datasheets/victrex_ tds 90hmf20.pdf (дата обращения 23.10.2017).

- Ready for take-off: Doors on the A350 with a primary structural component made from Victrex polymer [Электронный pecypc] URL: https://www.victrex. com/en/news/2015/09/airbus-bracket (дата обращения 23.10.2017).
- Space Environmental Testing of PEEK and PFA sample (ExHAM-PEEK) [Электронный pecypc] URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/ research/experiments/2009.html (дата обращения 23.10.2017).
- 5. *Huan-Chang Tseng, Rong-Yeu Chang, Chia-Hsiang Hsu* Numerical predictions of fiber orientation and mechanical properties for injection-molded long-glass-fiber thermoplastic composites // Composites Science and Technology 150, 2017. C. 181-186.
- Huan-Chang Tseng, Rong-Yeu Chang, Chia-Hsiang Hsu Improved fiber orientation predictions for injection molded fiber // Composites Composites: Part A 99,2017. C. 65–75.
- Modelling of multilayer actuator layers by homogenisation technique using Digimat software / Tomasz Trzepiecińskia, Grażyna Ryzińskaa, Mojtaba Biglara, Magdalena Gromadab // Ceramics International 43, 2017. C. 3259–3266.
- Основные характеристики материала PEEK 90HMF40 фирмы Victrex [Электронный реcypc] URL: https://www.victrex.com/~/media/ datasheets/victrex_tds_90hmf40.pdf (дата обращения 23.10.2017).
- 9. Барвинский И. Основы инженерных расчетов литья термопластов: технологические параметры // CADmaster. 2015. № 2.
- CADmaster. 2015. № 2.
 10. Stéphane Berbenni, Laurent Capolungo A Mori-Tanaka homogenization scheme for non-linear elasto-viscoplastic heterogeneous materials based on translated fields: An affine extension // C. R. Mecanique 343, 2015. C 95–106.
- 11. Influence of meso-structure and chemical composition on FDM 3D-printed parts / *Gianluca Alaimo, Stefania Marconi, Luca Costato, Ferdinando Auricchio //* Composites Part B 113, 2017. C. 371-380.

STRESS-STRAIN STATE ANALYSIS OF THE LUGS MADE FROM AN ANISOTROPIC COMPOSITE MATERIAL REINFORCED BY SHORT FIBERS

© 2017 E.I. Kurkin, V.O. Sadykova, M.O. Spirina

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The stress-strain state of the lugs made from PEEK 90HMF20 composite material reinforced by short fibers was analyzed. The problem of modeling the anisotropy of the mechanical characteristics of parts taking into account the direction of reinforcing fibers was discussed. Two sizes of lugs were considered. In Moldex 3D system the molding of the plate and determination of the orientation of the fibers was calculated. In the module Digimat MAP a model for transferring information about the orientation of the fibers when cutting the lugs from the plate is constructed. The received orientation tensor is used to construct a multi-level material model in the Digimat system. Calculation of the stress-strain state of the lugs was performed in the ANSYS Workbench. For each lug size, the displacement module fields and equivalent stresses were determined, and hole ovalization was also evaluated. The dependencies of the ovalization of the lugs, cut along and across the direction of molding of the plate, was compared. *Keywords:* composite material, lug, short fibers, stress-strain state.

Evgeny Kurkin, Candidate of Technics, Associate Professor of Aircraft Construction and Design Department. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru Vladislava Sadykova, Student. E-mail: vladislaava.s@yandex.ru Mariya Spirina, Student. E-mail: maryspirina@gmail.com