

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОАРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2016 В.А. Комаров, Е.И. Куркин, М.О. Спирина, Р.В. Чарквиани, Р.Н. Камалиева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 19.12.2016

Проведено исследование механических характеристик термопластичного композиционного материала на основе полиэфир-эфир-кетона, армированного короткими высокопрочными угольными волокнами. Рассмотрено два состава материала - с армированием 20% и 40%. Получены экспериментальные зависимости напряжений от деформаций образцов, вырезанных под углами 0° и 90° к направлению литья, позволяющие оценить анизотропию свойств исследованных композитов. Проведено построение многоуровневых моделей материала, используемых для описания напряженно-деформированного состояния изделий, с учетом ориентации армирующих волокон, определяемых с на основе исследования процесса литья. Верификация многоуровневых моделей проведена путем сравнения кривых нагружения исследованных образцов, полученных расчетным и экспериментальным путем.

Ключевые слова: композиционный материал, армирование, короткие волокна, механические характеристики, эксперимент, моделирование, многоуровневая модель, жесткость, прочность.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Короткоармированные полимерные композиционные материалы нашли широкое применение в самых разных отраслях промышленности. Внедрение подобных материалов зачастую позволяет находить новые, во многом уникальные технические решения, способствующие усовершенствованию конструктивно-технологического облика изделия. Основными преимуществами короткоармированных композитов являются высокие удельные характеристики (прочность, жесткость), технологичность, низкое влагопоглощение, стойкость к воздействию агрессивных сред, высокая ударная вязкость. За счет подбора состава и структуры составляющих компонентов появляется возможность гибкого проектирования изделия с учетом требуемых характеристик [1]. С другой стороны, высокая зависимость характеристик материала от параметров литья изделий повышает требования к используемым при проектировании моделям и контролю постоянства разработанной технологии производства

Комаров Валерий Андреевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: vkomarov@ssau.ru
Куркин Евгений Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru
Спирина Мария Олеговна, магистрант института авиационной техники. E-mail: maryspirina@gmail.com
Чарквиани Рамаз Валерьянович, аспирант института авиационной техники. E-mail: operam@yandex.ru
Камалиева Румия Нурисламовна, магистрант института авиационной техники. E-mail: kam.rn@yandex.ru

[2]. Целью работы является экспериментальное исследование механических характеристик анизотропного короткоармированного композиционного материала, а также создание и верификация многоуровневой модели исследованного материала на основе плоских образцов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

В работе проведено исследование механических характеристик короткоармированных композитов на основе полиэфирэфиркетона, армированного короткими угольными волокнами с содержанием 20% (PEEK 90NMF20) и 40% (PEEK 90NMF40). Исследование проведено на основе механических испытаний плоских образцов, изготавливаемых по стандарту ISO-527-2-2012 [3]. Образцы вырезаются из пластины изготовленной методом инжекционного литья из полиэфир-эфир-кетона (PEEK), армированного короткими углеродными волокнами. Изготовление образцов методом вырезания из пластины позволяет исследовать механические характеристики материала, с учетом различных углов расположения образцов к направлению литья, тем самым получая характеристики композита при различных углах армирования. Размеры пластины выбираются с целью обеспечения возможности вырезки образцов для проведения натуральных испытаний механических характеристик при растяжении в поперечном и продольном армировании направлении в соответствии со стандартом (рис. 1). Исследование механических характеристик про-

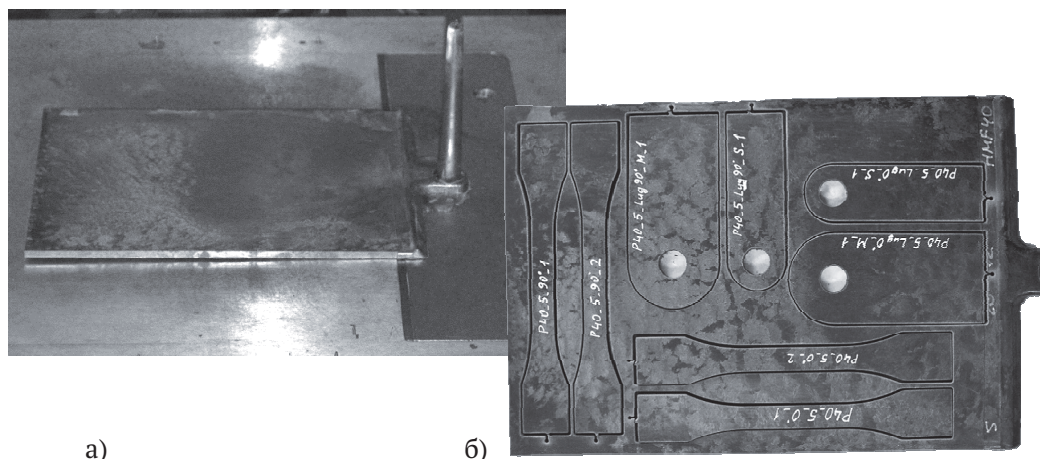


Рис. 1. Пластина из РЕЕК, изготовленной методом литья под давлением (а); расположение образцов на пластине (б)

ведено на универсальной сервогидравлической машине MTS 793. В ходе эксперимента проводились замеры усилия на штоке гидроцилиндра и перемещения лапок экстензометра с базой 25 мм. Построенные на основе экспериментальных данных зависимости напряжений от деформаций представлены на рис. 2.

3. ПОСТРОЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА

Определение проектировочных переменных многоуровневой модели короткоармированного композиционного материала проводилось путем обработки результатов испытаний с использованием реверс-инжиниринга. 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, разработанной в системе Digimat и экспериментальными данными. В основе реверс-инжиниринга лежит оптимизационный алгоритм, в качестве исходных данных для которого служит многоуровневая модель материала Digimat-MF. 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».

На первом этапе реальная ячейка представительного объема делится на так называемые псевдо-зерна. Сначала определяются свойства для каждого псевдо-зерна исходя из параметров микроструктуры по схеме Мори-Танака или Двойного включения, после этого конечные свойства эквивалентной однородной ячейки определяются по схеме Фойта. В случае материала РЕЕК ячейка представительного объема

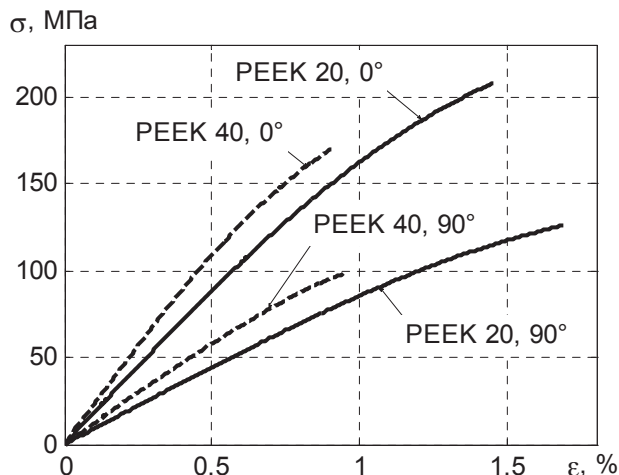


Рис. 2. Результаты испытаний образцов из материала РЕЕК 90НMF20 и РЕЕК 90НMF40

разбивалась на 12 псевдо-зерен, а разрушение наступало при разрушении 75 % всех псевдо-зерен. В каждом псевдо-зерне волокна имеют наиболее вероятное направление ориентации. Для описания случайной ориентации волокон в матрице вводится понятие тензора ориентации. Тензор ориентации, использованный при первой итерации моделирования материала PEEK показан на рис. 3.

Для нелинейных моделей материалов не существует точного аналитического решения, поэтому задача решается итерационно, численными методами. В модуле Digimat-MF реализован подход линеаризации нелинейных уравнений, который позволяет привести их к квазилинейной форме в скоростях напряжений или скоростях деформаций на некотором малом шаге и использовать вышеописанные концепции гомогенизации. Схема двухступенчатой гомогенизации позволяет применять известные критерии разрушения композитных материалов в локальной системе координат на уровне псевдо-зерен, которые имеют структуру, приближенную к однонаправленным композитным материалам.

Критерии разрушения могут быть заданы как на уровне композита, так и на уровне отдельных компонент (матрицы и волокон). Был применен критерий Цая-Хилла (3D), заданный на уровне композита. Данный подход позволяет достоверно предсказывать разрушение конструкции при минимуме необходимых экспериментальных 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. Для описания прочностных свойств использовался критерий Цая-Хилла для трансверсально-изотропных тел. 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-MX. Основные возможности модуля Digimat-MX: наличие базы данных материалов, дающей доступ к экспериментальным

данным, идентификация параметров моделей материалов, основанных на реакции гомогенизированного материала, возможность осуществления обратного инжиниринга. Данные полученные в результате эксперимента также могут быть добавлены в базу Digimat-MX в качестве тестового файла, содержащего значения напряжений и деформаций. В качестве исходных экспериментальных диаграмм деформирования были взяты диаграммы следующих образцов для материала PEEK 90НMF20: «0-3», «90-3»; для материала PEEK 90НMF40: «0-5», «90-7». В приведенных обозначениях первое число обозначает угол между направлением вырезки образца и направлением литья пластины, второе – номер образца из вырезаемой пластины. Результаты реверс-инжиниринга для материала PEEK 90НMF20 представлены на рис. 4а, для материала PEEK 90НMF40 на рис. 4б. Пунктирные линии соответствуют диаграммам деформирования, полученным экспериментально; сплошные – расчетные как результат реверс-инжиниринга. В таблицу 1 сведены оптимизированные параметры прочности и жесткости для материалов PEEK 90НMF20 и PEEK 90НMF40.

Следует отметить тот факт, что оптимизированные свойства полимерной матрицы, то есть матрицы в составе композита отличаются от свойств той же матрицы в исходном состоянии. Указанный подход применим для эффективного решения задач по определению напряженно-деформированного состояния и оценке запаса прочности конструкций из армированных пластиков, изготавливаемых методом инъекционного литья.

4. ВЕРИФИКАЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА

Создание численной модели, учитывающей особенность поведения материала, выполнялось с помощью системы DIGIMAT. С помощью модуля DIGIMAT MAP производится выборка и сохранение информации об ориентации волокон, располагающихся в месте вырезки образцов, что позволяет фактически смоделировать вырезку образца из пластины, полученной методом

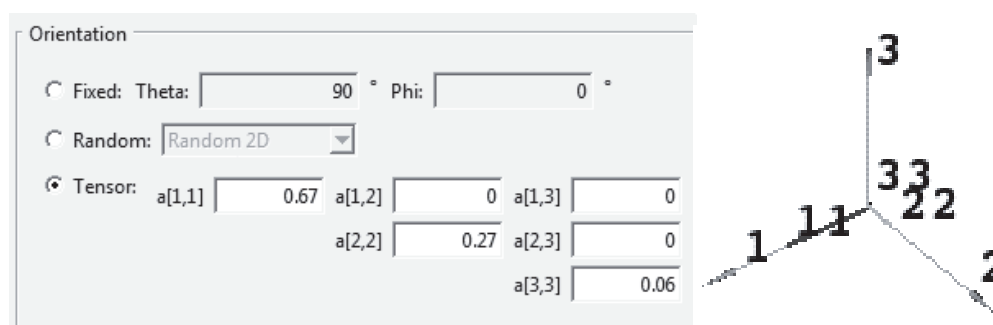


Рис. 3. Тензор ориентации материала PEEK

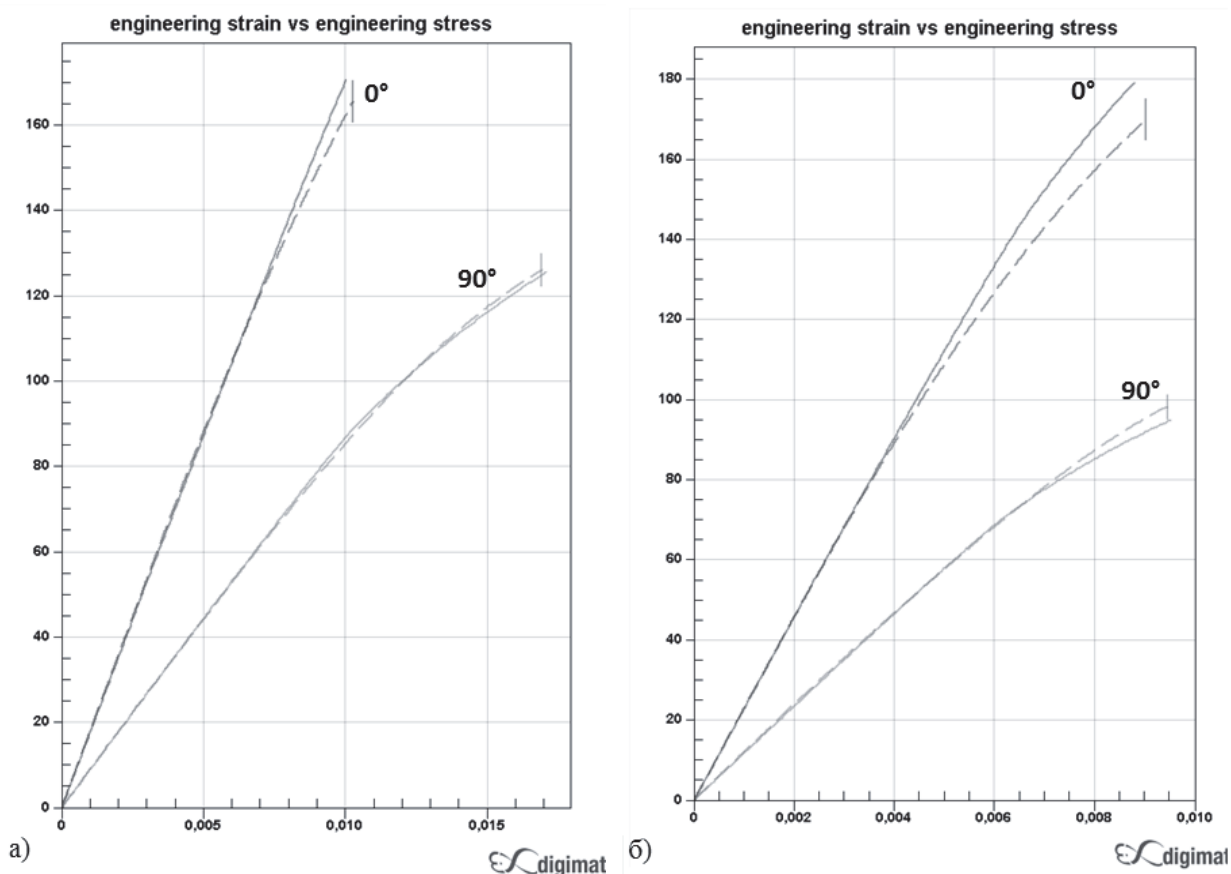


Рис. 4. Результаты реверс-инжиниринга для материала:
а) PEEK 90HMF20, б) PEEK 90HMF40

Таблица 1. Значения оптимизированных параметров

Параметр	PEEK 90HMF20	PEEK 90HMF40
Модуль упругости, МПа	4150	2928
Предел текучести, МПа	13,94	10
Параметр упрочнения, МПа	162,4	146
Коэффициент при экспоненте в законе упрочнения	0,23	0,298
Предел прочности при растяжении в направлении армирования, МПа	210,6	239
Предел прочности при растяжении в поперечном направлении, МПа	101,75	78,4
Предел прочности при сдвиге, МПа	58,8	20
Предельная деформация при растяжении в направлении армирования, %	0,014	0,0828
Предельная деформация при растяжении в поперечном направлении, %	0,021	0,00985
Предельная деформация при сдвиге, %	0,01	0,0737

литья под давлением. Проведена верификация построенной модели конечно-элементным моделированием с целью проверки и подтверждения работоспособности построенной многоуровневой модели материала с точки зрения описания с ее помощью процесса дефор-

мирования реального изделия. Для достижения поставленной цели решается связанная задача на основе метода конечных элементов с использованием систем ANSYS, DIGIMAT и Moldex3D. Рассматривались образцы в форме лопаток для испытаний на растяжение (ISO-527-2-2012) [4].

Моделировались случаи растяжения образцов в случае нагрузки, являющейся разрушающей в результате экспериментов, при вырезке их под углами 0° и 90° . Вследствие слоистой структуры отчетливо видно неоднородное распределение напряжений по толщине образца.

Верификация построенной модели материала проведена путем сравнения результатов моделирования перемещений лапок экстензометра под действием растягивающей нагрузки полученных методом конечных элементов с учетом анизотропии свойств материала с экспериментальными данными (рис. 5). Сравнение показывает, что построенная модель материала корректно отражает анизотропию его свойств и может использоваться для прогнозирования механических характеристик изготавливаемых из него изделий.

Прочность материала при действии сложной системы нагрузок может быть оценена при помощи различных критериев разрушения. Эти критерии соотносят напряженно-деформированное состояние, вызванное в материале заданной системой внешних сил, с пределами прочности материала, определенными для простых типов нагружения – одноосного растяжения-сжатия и сдвига. Для верификации описания прочности

материала с помощью многоуровневой модели построены поля эквивалентных напряжений. На рис. 6 представлены эквивалентные напряжения для образца «0-4», изготовленного из материала PEEK 90HMF20. Полученные результаты свидетельствуют об ярко выраженном центральном слое («core effect»), показывающем анизотропию характеристик материала исследованных образцов.

На рис. 7 приведен расчет критерия прочности по эквивалентным напряжениям для образца «90-4», изготовленного из материала PEEK 90HMF20.

ВЫВОДЫ

В результате исследования экспериментально получены механические характеристики термопластичного композиционного материала на основе полиэфир-эфир-кетона, армированного короткими высокопрочными угольными волокнами. Рассмотрено два состава материала – с армированием 20% и 40%. Построена многоуровневая модель материала, позволяющая проводить оценку жесткости и прочности изделий, изготовленных из исследуемого материала, с учетом ориентации армирующих волокон, определяемых на

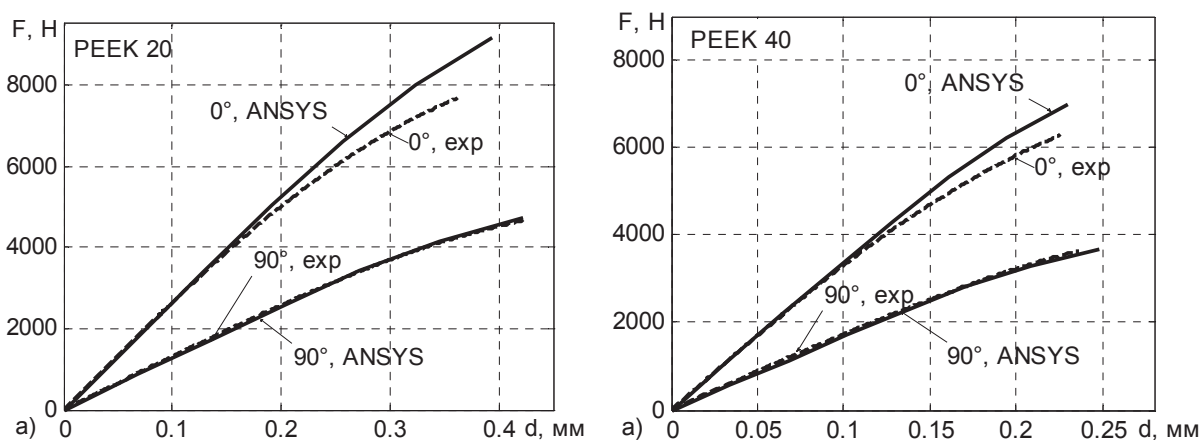


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования растяжения образца с учетом анизотропии материала с экспериментальными данными

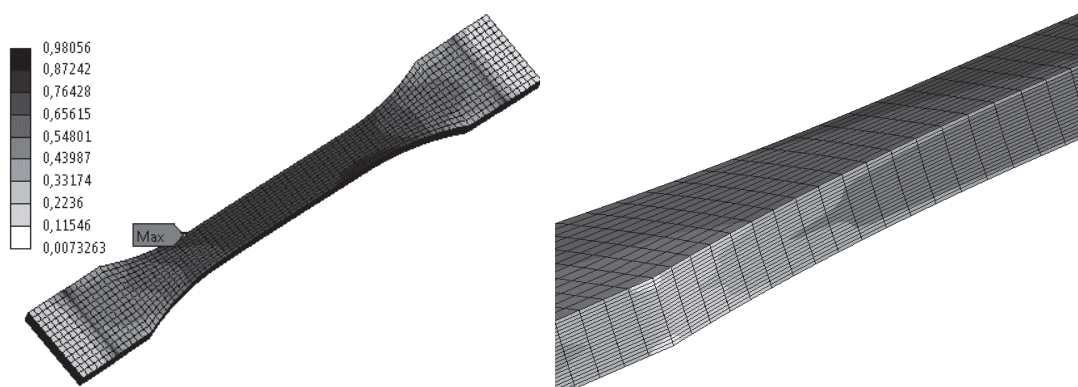


Рис. 6. Поле критерия эквивалентных напряжений для образца «0-4»

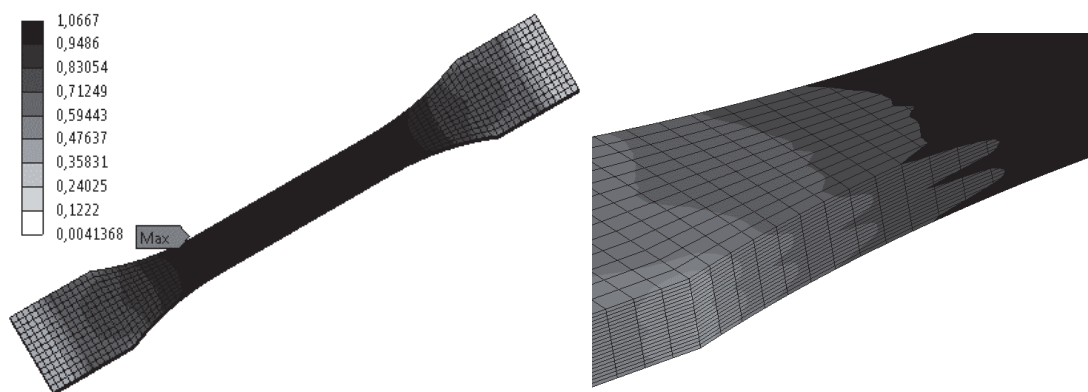


Рис. 7. Поле критерия эквивалентных напряжений для образца «90-4»

основе исследования процесса литья. Проведена верификация модели материала путем сравнения полученных с ее помощью кривых деформаций испытанных образцов с экспериментальными данными. Рассчитанные критерии разрушения близки к единице, что означает корректное предсказание несущей способности исследуемых образцов разработанной моделью анизотропного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мэттьюз Ф., Роллингс Р. Мир материалов и технологий. Композиционные материалы. Механика и технология. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
2. Hull D. An Introduction to Composites Materials, Cambridge University Press. 1981.
3. ISO-527-2-2012 - Plastics. Determination of tensile properties. Test conditions for moulding and extrusion plastics, ISBN 978 0 580 70623 3, 02.03.2012, 20 p.

ANALYSIS OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF REINFORCED COMPOSITE MATERIAL

© 2016 V.A. Komarov, E.I. Kurkin, M.O. Spirina, R.V. Charkviani, R.N. Kamaliev

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

An analysis of mechanical characteristics of the thermoplastic composite material, based on the polyester-ether-ketone reinforced by short, high-strength carbon fibers was done. Two material composition was considered: reinforced with 20% and 40%. The experimental dependence of the stresses from the deformations of the samples cut at angles of 0 ° and 90 ° to the direction of molding, to assess the anisotropy of the properties of the tested composites. Building of multi-level models of the material was done, which are used to describe the stress-strain state of products, taking into account the orientation of the reinforcement fibers, as determined on the basis of the casting process. Verification of multilevel models was done by comparing the curves of load test samples obtained by calculation and experiment. *Keywords:* modeling, strength, multi-level model, the stress-strain state, stiffness.

Valery Komarov, Doctoral Degree in Engineering, Head at the Aircraft Construction and Design Department.

E-mail: vkomarov@ssau.ru

Evgeny Kurkin, Candidate Degree in Engineering, Associate Professor at the Aircraft Construction and Design Department.

E-mail: eugene.kurkin@mail.ru

Mariya Spirina, Graduate Student of Institute of Aeronautical Engineering. E-mail: maryspirina@gmail.com

Ramaz Charkviani, Postgraduate Student of Institute of Aeronautical Engineering of Samara University.

E-mail: oneram@yandex.ru

Rumiya Kamaliev, Graduate Student of Institute of Aeronautical Engineering. E-mail: kam.rm@yandex.ru