



20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»

20th International Conference "Aviation and Cosmonautics"



**КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И КОНСТРУКЦИИ**

**COMPOSITE MATERIALS
AND CONSTRUCTIONS**

II МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
II INTERNATIONAL CONFERENCE

ТЕЗИСЫ ABSTRACTS

Москва, МАИ
Moscow, MAI

2021

**II-я Международная конференция
«Композитные материалы и конструкции»**

**II International Conference
“Composite Materials and Constructions”**

Тезисы

Abstracts

Москва, МАИ
16 ноября 2021 г.

Moscow, MAI
16 November 2021

УДК 678
ББК 34.391.91я43
В87

II Международная конференция «Композитные материалы и конструкции». 16 ноября 2021 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2021. – 1,56 Мбайт. [Электронное издание].

II International Conference “Composite Materials and Constructions”. 16 November 2021. Moscow. Abstracts. – Publishing house “Pero”, 2021. – 1,56 MB. [Electronic edition]

ISBN 978-5-00189-727-9

В сборник включены доклады, представленные в Организационный комитет конференции в электронном виде.

Конференция проводится в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 16 ноября 2020 г. № 075-15-2020-924).

Abstracts, which were sent to Organizing Committee in electronic form, are included in the digest.

The conference is held in the implementation of the program for the creation and development of the World-Class Research Center “Supersonic” for 2020-2025 funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

ISBN 978-5-00189-727-9

©Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), 2021

©Moscow Aviation Institute
(National Research University), 2021

Организатор

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

Организационный комитет

Шемяков А.О., проректор по стратегическому развитию — председатель

Zhaohui Wu, президент Чжэцзянского Университета

Петер Руссер, профессор Технического университета Мюнхена

Дин Вучинич, профессор Брюссельского свободного университета

Mangey Ram, Research Professor, Graphic Era Deemed to be University

Adarsh Anand, Assistant Professor, University of Delhi

Замковой А.А., начальник управления научных программ и проектов
МАИ

Ефремов А.В., заведующий кафедрой «Динамика и управление полётом
пилотируемых ЛА» МАИ — руководитель направления «Авиационные
системы»

Монахова В.П., директор дирекции института № 2 «Авиационные,
ракетные двигатели и энергетические установки» МАИ — руководитель
направления «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические
установки»

Следков Ю.Г., директор дирекции института № 3 «Системы управления,
информатика и электроэнергетика» МАИ — руководитель направления
«Системы управления, информатика и электроэнергетика»

Кирдяшкин В.В., директор дирекции института № 4 «Радиоэлектроника,
инфокоммуникации и информационная безопасность» МАИ —
руководитель направления «Информационно-телекоммуникационные
технологии авиационных, ракетных и космических систем»

Алифанов О.М., заведующий кафедрой «Космические системы и
ракетостроение» МАИ — руководитель направления «Ракетные и
космические системы»

Кривилёв А.В., директор дирекции института № 7 «Робототехнические и
интеллектуальные системы» МАИ — руководитель направления
«Робототехника, интеллектуальные системы и авиационное вооружение»

Крылов С.С., директор дирекции института № 8 «Информационные
технологии и прикладная математика» МАИ — руководитель
направления «Математические методы в аэрокосмической науке и
технике»

Беспалов А.В., директор дирекции института № 11 «Материаловедения и
технологий материалов» МАИ — руководитель направления «Новые
материалы и производственные технологии в области авиационной и
ракетно-космической техники»

Новиков С.В., директор дирекции института № 5 «Инженерная
экономика и гуманитарные науки» МАИ — руководитель направления
«Экономика и менеджмент предприятий аэрокосмического комплекса»

Булакина М.Б., директор IT-центра МАИ

Яковлева А.В., руководитель проектор Дирекции космических программ
МАИ

Калягин М.Ю., заместитель директора Центра БПЛА МАИ

Назаров Е.В., начальник лаборатории №2 НИО-101 МАИ

Программный комитет

Равикович Ю.А., проректор по научной работе — председатель

Zhaohui Wu, президент Чжэцзянского Университета

Петер Руссер, профессор Технического университета Мюнхена

Дин Вучинич, профессор Брюссельского свободного университета

Mangey Ram, Research Professor, Graphic Era Deemed to be University

Adarsh Anand, Assistant Professor, University of Delhi

Медведский А.Л., первый заместитель генерального директора ФГУП «ЦАГИ»

Терентьев В.В., начальник научно-организационного управления МАИ

Веремеенко К.К., начальник научно-исследовательского отделения института № 3 «Системы управления, информатика и электроэнергетика» МАИ

Грушин И.А., заместитель директора по научной работе института № 11 «Материаловедения и технологий материалов» МАИ

Долгов О.С., директор дирекции института № 1 «Авиационная техника» МАИ

Заговорчев В.А., начальник научно-исследовательского отделения института № 6 «Аэрокосмический» МАИ

Зубанова С.Г., профессор кафедры И-11 «Иностранный язык для аэрокосмических специальностей» МАИ

Ионов А.В., заместитель директора института № 2 «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки» МАИ

Кирдяшкин В.В., директор дирекции института № 4 «Радиоэлектроника, инфокоммуникации и информационная безопасность» МАИ

Кириллов А.А., начальник научно-исследовательского отделения института № 7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» МАИ

Крылов С.С., директор дирекции института № 8 «Информационные технологии и прикладная математика» МАИ

Силуянова М.В., профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов» МАИ

Тихонов Г.В., начальник научно-исследовательского отделения института № 5 «Инженерная экономика и гуманитарные науки»

Стрелец Д.Ю., начальник НИО-101 МАИ

Яковлева А.В., руководитель проектов Дирекции космических программ МАИ

Калягин М.Ю., заместитель директора Центра БПЛА МАИ

Назаров Е.В., начальник лаборатории №2 НИО-101 МАИ

Organizer

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Organizing Committee

Aleksander Shemiakov, Chairman of the Organizing Committee, Vice-rector for strategy development, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Zhaohui Wu, Co-chairman of the Organizing Committee, President, Zhejiang University, Zhejiang, China

Peter Russer, Co-chairman of the Organizing Committee, professor, Technical University of Munich, Munich, Germany

Dean Vučinić, Co-chairman of the Organizing Committee, professor, Vrije University Brussel, Brussel, Belgium

Mangey Ram, Co-chairman of the Organizing Committee, Research Professor, Graphic Era Deemed to be University, Dehradun, India

Adarsh Anand, Co-chairman of the Organizing Committee Assistant Professor, University of Delhi, Delhi, India

Andrey Zamkovoy, Head of the MAI Scientific Programs and Projects Department, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Aleksandr Efremov, Head of the MAI department 106 “Dynamics and Flight Control of Manned Aircraft”, Head of direction “Aviation Systems”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Veronika Monakhova, Director of the MAI Institute No. 2 “Power Installations of Aviation, Rocket and Space Systems”, Head of direction “Power Installations of Aviation, Rocket and Space Systems”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Yury Sledkov, Director of the MAI Institute No. 3 “Control Systems, Informatics and Power Generation”, Head of direction “Control Measuring and Computing Systems and Complexes and Onboard Power Generation”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Vladimir Kirdyashkin, Director of the MAI Institute No. 4 “Radioelectronics, Infocommunications and Information Security”, Head of direction “Information and Telecommunication Technologies of Aviation, Rocket and Space Systems”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Oleg Alifanov, Head of the MAI department 601 “Space Systems and Rocket Engineering”, Head of direction “Rocket and Space Systems”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Aleksander Krivilev, Director of the MAI Institute No. 7 “Robotics and Intelligent Systems”, Head of direction “Robotics, Intelligent Systems and Aircraft Armament”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Sergey Krylov, Director of the MAI Institute No. 8 “Information Technology and Applied Mathematics”, Head of direction “Mathematical Methods in Aerospace Science and Technology”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Alexander Beshpalov, Director of the MAI Institute No. 11 “Material Science and Technology”, Head of direction “New Materials and Production Technologies in the Areas of Aviation, Rocket and Space Technique”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Sergey Novikov, Director of the MAI Institute No. 5 “Business Engineering and Humanities”, Head of direction “Economics and Management at Enterprises of Aerospace Complexes”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Maria Bulakina, Head of MAI IT-center, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia
Anna Yakovleva, Head of the projects at MAI Space Programs Direction, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Maksim Kalyagin, Deputy Head of MAI UAV-center, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Egor Nazarov, Head of the Lab 2 of the MAI Research Department 101, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Program Committee

Yury Ravikovich, Chairman of the Program Committee, Vice-rector for scientific affairs, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Zhaohui Wu, Co-chairman of the Program Committee, President, Zhejiang University, Zhejiang, China

Peter Russer, Co-chairman of the Program Committee, professor, Technical University of Munich, Munich, Germany

Dean Vučinić, Co-chairman of the Program Committee, professor, Vrije University Brussel, Brussel, Belgium

Mangey Ram, Co-chairman of the Organizing Committee, Research Professor, Graphic Era Deemed to be University, Dehradun, India

Adarsh Anand, Co-chairman of the Organizing Committee Assistant Professor, University of Delhi, Delhi, India

Aleksandr Medvedsky, Deputy Head of Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia

Vadim Terentyev, Head of the MAI Scientific and Organizational Department, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Oleg Dolgov, Director of the MAI Institute No. 1 “Aircraft Engineering”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Ivan Grushin, Deputy Director for Scientific Affairs of the MAI Institute No. 11 “Material Science and Technology”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Aleksey Ionov, Deputy Director of the MAI Institute No. 2 “Aviation, Rocket Engines and Power Installation”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Konstantin Veremeenko, Head of the Research Department of the MAI Institute No. 3 “Control Measuring and Computing Systems and Complexes and Onboard Power Generation”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia
Vladimir Kirdyashkin, Director of the MAI Institute No. 4 “Radioelectronics, Infocommunications and Information Security”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Vladimir Zagovorchev, Head of the Research Department of the MAI Institute No. 6 “Aerospace Engineering”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Alexey Kirillov, Head of the Research Department of the MAI Institute No. 7 “Robotic and Intelligent Systems”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Sergey Krylov, Director of the MAI Institute No. 8 “Information Technologies and Applied Mathematics”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Marina Siluyanova, Professor of the MAI Department “Production Technology and Exploitation of Aircraft Engines”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Gennady Tikhonov, Head of the Research Department of the MAI Institute No. 5 “Business Engineering and Humanities”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Svetlana Zubanova, Professor of the MAI Department I-11 “Foreign Language for Aerospace Specialties”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Dmitry Strelets, Head of the MAI Research Department 101, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Anna Yakovleva, Head of the projects at MAI Space Programs Direction, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Maksim Kalyagin, Deputy Head of MAI UAV-center, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Egor Nazarov, Head of the Lab 2 of the MAI Research Department 101, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Оглавление

СЕКЦИЯ 1. МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ.....	11
СЕКЦИЯ 2. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПКМ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ НА ИХ ОСНОВЕ.....	35
СЕКЦИЯ 3. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ (ПКМ) ДЛЯ АВИАСТРОЕНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭНЕРГЕТИКИ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ ПКМ	61
АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	95

Contents

**SECTION 1. ADVANCED TECHNOLOGIES OF POLYMER
COMPOSITE MATERIALS (PCM) PROCESSING FOR THE
MANUFACTURE OF STRUCTURES ON THEIR BASIS11**

**SECTION 2. ADVANCED TECHNOLOGIES OF POLYMER
COMPOSITE MATERIALS (PCM) PROCESSING FOR THE
MANUFACTURE OF STRUCTURES ON THEIR BASIS35**

**SECTION 3. POLYMER COMPOSITE MATERIALS (PCM)
FOR AIRCRAFT DESIGN, POWER ENGINEERING AND
CONSTRUCTION, METHODS OF RESEARCH AND
TESTING OF PCM61**

INDEX95

Секция 1. Методы проектирования, расчета и оптимизации конструкций из ПКМ

Section 1. Advanced Technologies of Polymer Composite Materials (PCM) Processing for the Manufacture of Structures on Their Basis

Исследование влияния повреждений локальной зоны крыла на несущую способность подкрепленных композитных панелей

Больших А.А., Боровков Д.К., Устинов Б.Е.
МАИ, г. Москва, Россия

В работе описан метод двухфазного расчёта конструктивно-подобных элементов, основанный на переносе напряжённо-деформированного состояния из глобальной модели в локальную.

Для реализации метода создаётся дискретная сетка исследуемой области и локальная модель подкреплённой обшивки. Суть разработанного метода позволяет изменить пространство моделирования с оболочечной глобальной модели на более подробную твердотельную локальную модель с использованием метода когезионного слоя и послойного моделирования слоистого композиционного материала.

Метод двухфазного анализа несущей способности подкреплённых обшивок с нанесенными ударными дефектами состоит из двух этапов. Первый этап представляет собой статический расчет глобальной оболочечной модели всей конструкции при критическом режиме нагружения. На втором этапе подготавливается подробная локальная твердотельная модель исследуемой зоны подкреплённой обшивки и проводится динамический анализ на ударное воздействие. Далее переносятся сжимающие силовые потоки или перемещения из глобальной модели на замкнутый контур локальной зоны и производится решение в динамической, либо в статической постановке.

Данная статья представляет разработанную методику глобально-локального моделирования, позволяющую произвести анализ несущей способности подкреплённой обшивки после ударного воздействия с более подробной сеткой без дискретизации элементов глобальной модели, что ускоряет и уточняет полученный расчёт

Investigation of the influence of the wing local area damage on the capacity of stiffened composite panels

Bolshikh A.A., Borovkov D.K., Ustinov B.E.
MAI, Moscow, Russia

The paper describes a method of two-phase calculation of structurally like elements based on the transfer of the stress-strain state from the global model to the local one.

To implement the method, a discrete mesh of the studied area and a local model of the stiffened skin panel are created. The essence of the developed method makes it possible to change the modeling space from a shell global model to a more detailed solid-state local model using the cohesive layer method and layer-by-layer modeling of a layered composite material.

The method of two-phase analysis of the bearing capacity of stiffened skins with applied impact defects consists of two stages. The first stage is a static calculation of the global shell model of the entire structure under critical loading conditions. On the second stage, a detailed local solid model of the studied stiffened panel zone is prepared and a dynamic impact analysis is performed. Next, compressive force flows or displacements from the global model are transferred to a closed loop of the local zone and a calculation is performed in a dynamic or static formulation.

This article presents the developed methodology for global-local modeling, which makes it possible to analyze the bearing capacity of the stiffened skin after impact with a more detailed mesh without discretizing the elements of the global model, which speeds up and refines the resulting calculation.

Методы исследования статической прочности конструктивно-анизотропных панелей ЛА из композиционных материалов по уточнённой теории

Гавва Л.М.

МАИ, г. Москва, Россия

Эффективность применения композиционных материалов в несущих конструкциях ЛА определяется степенью совершенства согласованных концепций расчёта, методов расчёта и технологии производства изделия. Новые расчётные модели в уточнённой постановке составляют основу процессов оптимизации.

Рассматриваются статические задачи для плоской прямоугольной многослойной панели из полимерных композиционных материалов, обшивка которой эксцентрично подкреплена продольно-поперечным набором, и для плоской прямоугольной гладкой обшивки, обладающей анизотропией вследствие несимметрии свойств структуры пакета по толщине. Панели находятся под действием распределённой поперечной нагрузки в технологическом температурном поле. Условия закрепления граничных кромок произвольны.

Целью данной работы являются постановка задач статики, моделирование напряжённо-деформированного состояния и исследование статической прочности конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов, а также разработка аналитических подходов к решению с учётом технологии изготовления панелей в рамках разрешающего дифференциального уравнения восьмого порядка. Коэффициенты уравнения определяются геометрией панели и упругими характеристиками материала конструкции.

Учитывается влияние процесса технологии изготовления композитов: остаточные температурные напряжения, возникающие при охлаждении после завершения процесса отверждения, и предварительное натяжение армирующих волокон.

Разрешающее уравнение восьмого порядка построено с уточнением модели при закручивании подкрепляющего элемента, находящегося в условиях одностороннего контакта с обшивкой. Решение краевых задач в замкнутом виде выполнено в однократных тригонометрических рядах для частного случая согласованных граничных условий по двум противоположным кромкам. Краевые условия на торцах соответствуют достаточно общей трактовке физических граничных условий элементов конструкции.

Для оценки послойных эквивалентных напряжений и запасов прочности конструктивно-анизотропной панели используется критерий Гольденבלата-Копнова.

В операционной среде MATLAB разработан пакет прикладных программ. Оценивается влияние предварительного натяжения армирующих волокон на уровень эквивалентных остаточных технологических напряжений в углепластиковых панелях. Определяется оптимальный уровень предварительного натяжения в процентном отношении от допускаемой деформации слоя для различных схем укладки слоёв в пакете. Проанализированы послойные эквивалентные напряжения и запасы прочности в углепластиковых стрингерных панелях.

Постановка задач исследования напряжённо-деформированного состояния и предлагаемые подходы к решению являются новыми разработками и представляют интерес с точки зрения практики проектирования панелей из современных композиционных материалов для перспективных изделий авиационной техники.

Работа выполнена в рамках ГЗ Министерства науки и высшего образования РФ, тема № FSFF-2020-0013.

Литература:

1. Гавва Л.М., Фирсанов В.В. Математические модели и методы расчета напряженно-деформированного состояния панелей летательных аппаратов из композиционных материалов с учетом технологии изготовления // Известия РАН. МТТ. – 2020. - №3. - С. 122-133.

Берсия: Gavva L.M., Firsanov V.V. Mathematical Models and Methods for Calculating the Stress-Strain State of Aircraft Panels from Composite Materials Taking into Account the Production Technology // Mechanics of Solids (Springer). – 2020. - № 3.- PP. 603-612.

Investigation methods of static strength with refined theory of structurally-anisotropic aircraft panels made from composite materials

Gavva L.M.

MAI, Moscow, Russia

New design problem – design to cost – can be solved by combining exact models with modern computer technologies and test program decrease. The efficiency of composite materials for aircraft bearing composite structures is defined as the account concept, account method and production technology degree of perfection.

New mathematical models in refined statement are the optimization process base.

The static problems of flat rectangular composite panels with and without the eccentric longitudinal-transverse stiffening set is discussed, with the panels subjected to transverse distributed loading in technology temperature field. The boundary conditions at the ends of the panels are generally assumed.

The aim of this study is the static problem statement, stress-strain state modeling and static strength investigation of structurally-anisotropic composite panels. The aim of this study is also the analytic approach design in view of panel production technology for the resolved eighth-order differential equation. The equation constants depend on geometric and stiffness characteristics of the panel and composite material.

One considers the technological factors occurring in the fabrication of composites, namely, the residual thermal stresses arising during cooling after hardening and the preliminary tension of the reinforcing fibers that is performed in order to increase the bearing strength of the structure.

The design model of a stringer under eccentric contact with the skin was developed. The solution is designed by a single trigonometric series for the particular case of conformable boundary conditions at two opposite sides. All possible combinations of the edge restrictions in relation to the connecting plane and bending problems are examined.

Goldenblat-Kopnov's criteria is used to estimate the layerwise equivalent stresses and strength margins of structurally-anisotropic panels.

A computer MATLAB program package was performed and used for the computer multi-criteria optimization of the design of Flying Aircrafts (FA) structurally-anisotropic composite panels.

The influence of the preliminary tension of the reinforcing fibers on the level of equivalent residual technology stresses for carbon-plastic panels is estimated. The optimal level of the preliminary tension is defined for the different package layouts. The layerwise equivalent stresses and strength margins of carbon-plastic stringer panel have been analyzed.

The static strength and stress-strain state problem statement and proposed solution approaches are novel. This is of interest for practical design of the panels made from modern composite materials for the perspective aircraft structure elements.

Acknowledgements. The study was performed in the framework of the Ministry of Science and Higher Education (Russia), the project № FSFF-2020-0013.

References:

1. Gavva L.M., Firsanov V.V. Mathematical Models and Methods for Calculating the Stress- Strain State of Aircraft Panels from Composite Materials Taking into Account the Production Technology // Mechanics of Solids (Springer). – 2020. - № 3.- PP. 603-612.

Разработка и апробация методики моделирования композитных подкрепленных панелей с учетом дефектов типа BVID

Клесарева М.В., Больших А.А., Назаров Е.В., Устинов Б.Е.

МАИ, г. Москва, Россия

Устойчивость к ударным повреждениям материалов из углепластика остается важной проблемой при проектировании конструкции. Ущерб от удара, который в основном характеризуется растрескиванием матрицы, расслоением и разрывом волокон, как правило, распространяется далеко за пределы точки удара. Такие повреждения в основном присутствуют внутри ламината, и визуально их трудно обнаружить снаружи. Даже в случае удара с низкой скоростью/низкой энергией остаточная прочность на сжатие может быть значительно снижена.

Для исследования несущей способности при сжатии двухстрингерных панелей с нанесенным ударным повреждением в межстрингерной зоне был проведен обзор современных работ по рассматриваемой тематике [1-2] и сформирован перечень конструктивно-подобных однопролетных плоских панелей, представляющих собой прямоугольную пластину (обшивку), подкрепленную в продольном направлении двумя стрингерами. Переменными параметрами в рассматриваемой задаче являются толщина и ширина обшивки. На первом шаге моделируется удар энергией 140 Дж. В качестве граничных условий принята абсолютно жесткая заделка по всем сторонам панели. Сжатие после удара реализуется созданием жестких пластин, имитирующих оснастку, движение траверсы задано посредством перемещения. Кроме того, на свободных краях приняты условия обеспечения устойчивости.

Разрушение панелей должно происходить по ослабленному ударным повреждением сечению с расслоением материала обшивки и стрингеров. Результаты расчетов, разработанных КЭ моделей в соответствии с пирамидой расчетно-экспериментальных образцов, позволяют уточнить расчетные характеристики, полученные на этапе проектирования, с целью подтверждения пунктов АП-25.571 и АП-25.631 при дальнейшей сертификации.

Литература:

1. An Applied Method for Predicting the Load-Carrying Capacity in Compression of Thin-Wall Composite Structures with Impact Damage / O. Mitrofanov, I. Pavelko, S. Varickis, A. Vagele // *Mechanics of Composite Materials*. – 2018. – Vol. 54. – No 1. – P. 99-110. – DOI 10.1007/s11029-018-9722-z.
2. Особенности методологии проектирования несущих панелей из композитных материалов при сжатии с учетом повреждений от ударных воздействий / О. В. Митрофанов, И. В. Павелко, В. А. Константинов, А. В. Эсауленко // *Естественные и технические науки*. – 2018. – № 1(115). – С. 109-112.

Development and validation of modeling technique for composite stiffened panels considering BVID defects

Klesareva M.V., Bolshikh A.A., Nazarov E.V., Ustinov B.E.
MAI, Moscow, Russia

Impact resistance of CFRP materials remains an important issue in structural design. Impact damage, which is mainly characterized by matrix cracking, delamination and fiber breakage, typically extends well beyond the point of impact. Such damage is mainly present inside the laminate and is difficult to visually detect from the outside. Even in the case of a low velocity / low energy impact, the residual compressive strength can be significantly reduced.

To study the bearing capacity in compression of two-stringer panels with inflicted impact damage in the interesting zone, a review of modern works on the topic under consideration was carried out [1-2] and a list of structurally-similar single-span flat panels was formed, which is a rectangular plate (skin), reinforced in the longitudinal direction two stringers. Variable parameters in the problem under consideration are the thickness and width of the skin. At the first step, an impact with an energy of 140 J is modeled. As the boundary conditions, an absolutely rigid restraint on all sides of the panel is taken. Compression after impact is realized by creating rigid plates that simulate rigging, the movement of the traverse is specified by means of movement. In addition, the conditions for ensuring stability are adopted on the free edges.

The destruction of the panels should occur along the section weakened by impact damage with delamination of the skin material and stringers. The results of calculations of the developed FE models in accordance with the pyramid of design and experimental samples make it possible to clarify the design characteristics obtained at the design stage in order to confirm points AP-25.571 and AP-25.631 with further certification.

References:

1. An Applied Method for Predicting the Load-Carrying Capacity in Compression of Thin-Wall Composite Structures with Impact Damage / O. Mitrofanov, I. Pavelko, S. Varickis, A. Vagele // *Mechanics of Composite Materials*. – 2018. – Vol. 54. – No 1. – P. 99-110. – DOI 10.1007/s11029-018-9722-z.

2. Особенности методологии проектирования несущих панелей из композитных материалов при сжатии с учетом повреждений от ударных воздействий / О. В. Митрофанов, И. В. Павелко, В. А. Константинов, А. В. Эсауленко // Естественные и технические науки. – 2018. – № 1(115). – С. 109-112.

Оценка прочности полимерного композиционного материала с учётом технологических дефектов при помощи вычислительной микромеханики

Ковтунов С.С., Утябаева А.Р., Грох Ю.А., Турбин Н.В.

МАИ, г. Москва, Россия

В аэрокосмической промышленности существуют строгие требования к надежности конструкционных материалов, что объясняет обширные испытания на образцах конструкции разного уровня сложности. В работе представлен микромеханический анализ армированных волокнами композитов, включающий исследование репрезентативного (представительного) объемного элемента (RVE). В качестве рассматриваемого материала взята эпоксидная матрица, армированная однонаправленными стеклянными волокнами (GFRP). Микромеханические модели образцов смоделированы при помощи пакетов Simulia Abaqus, Solid Works и Catia в виде элементарных ячеек, включающих основные составляющие реального композита, такие как: волокно, матрица и граница раздела между ними. Начальные напряжения в материале отсутствуют. Входными данными для моделирования являются упругие и прочностные свойства компонентов, геометрия и размер RVE. Отслеживаемый технологический дефект – криволинейность волокон. Выявлено, насколько данный дефект влияет на прочность композита.

С целью проверки микромеханической модели, используемой для расчета гомогенизированных свойств, получена прочность при совместном действии продольного сжатия и поперечного растяжения. Проведено сравнение результатов расчета образцов с прямолинейными волокнами с образцами с криволинейными волокнами.

Полученные данные могут использоваться при подготовке и проведении испытаний композиционных материалов, проектировании элементов конструкций, находящихся в условиях многоосного нагружения, а также при разработке технологических рекомендаций по изготовлению и контролю композитных деталей с ранее не применяемыми размерами, формой и структурой.

Estimation of a polymer composite material strengths, considering technological defects by methods of computational micromechanics

Kovtunov S.S., Utiabaeva A.R., Grokh J.A., Turbin N.V.

MAI, Moscow, Russia

In the aerospace industry, there are strict requirements for the reliability of structural materials, which explains the extensive test programs on samples of structures of various levels of complexity.

The paper presents a micromechanical analysis of fiber-reinforced composites. A computational micromechanics model based on representative volume element to predict the failure of unidirectional (UD) glass fibers (GFRP) composites is used.

Micromechanical models of samples are modeled using Simulia Abaqus, Solid Works and Catia packages in the form of elementary cells that include the main components of a real composite, such as: fiber, matrix and the interface between them. There are no initial stresses in the material. The input data for modeling are elasto-plastic and strength properties of the components, geometry and size of the RVE. Considered fabrication defect – waviness of fibers. The influence of this defect on the strength of the composite is revealed.

In order to test the micromechanical model used to calculate the homogenized properties, the strength under the combined action of longitudinal compression and transverse tension is obtained. The comparison of calculation results of samples with straight fibers and those with technological defect is made.

The obtained data can be used in the preparation and realization of test program of composite materials, in the design of the structural elements under multi-axial stresses, as well as in the development of technological recommendations for manufacturing of composite parts with new geometry.

Прогнозирование кривых деградации усталостной жесткости FRP с использованием ANN

Лупачев Д.К., Турбин Н.В.

МАИ, г. Москва, Россия

Армированные волокном полимеры (FRP) широко используются в качестве основного материала в таких отраслях промышленности, как аэрокосмическая промышленность и машиностроение, благодаря легкому весу, превосходным механическим свойствам и высокой коррозионной стойкости.

Как материал, используемый в первичных конструкциях, он требует оценки данных об усталости, что требует многократных дорогостоящих экспериментов с различными случаями нагрузки, типами образцов, типами волокон/матрицы и укладками.

По сравнению с металлами композитные материалы обладают очевидным свойством ухудшения жесткости, которое жизненно важно отслеживать. В то же время, это свойство может быть использовано при расчете усталостной долговечности или для неразрушающего контроля конструкции.

Из-за сложности усталостного типа повреждений довольно сложной задачей является прогнозирование кривых усталости, особенно для прогнозирования кривых снижения жесткости в композитных материалах, армированных волокном.

Текущая работа предоставляет решение типа ANN (Искусственная нейронная сеть) для прогнозирования кривых деградации усталостной жесткости. Этот подход может сократить количество необходимых экспериментов и помочь спрогнозировать кривую снижения жесткости на основе предыдущих данных.

Литература:

1. W. Hwang, K.S. Han. Fatigue of composites fatigue modulus concept and life prediction. J. Compos. Mater., 20 (2) (1986), pp. 154-165.
2. Djamel Djeghader, Bachir Redjel. Weibull analysis of fatigue test in jute reinforced polyester composite material. Composites Communications, 17 (2020), pp. 123-128, 10.1016/j.coco.2019.11.016.
3. Hemanth Kumar, R.P. Swamy, Fatigue life prediction of glass fiber reinforced epoxy composites using artificial neural networks. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100812>.
4. B. Harris. Fatigue in Composite, vol. 3, CRC/WP (2003).
5. W. Johnson, B. Hillberry (Eds.), Probabilistic Aspects of Life Prediction, ASTM Int (2004).
6. Aleksander Muc. Fuzzy approach in modeling static and fatigue strength of composite materials and structures. Neurocomputing, 393 (2020), pp. 156-164, 10.1016/j.neucom.2018.12.094.
7. Anastasios P. Vassilopoulos, Efstratios F. Georgopoulos, Vasileios Dionysopoulos. Artificial neural networks in spectrum fatigue life prediction of composite materials. Int. J. Fatig., 27 (1) (2007), pp. 20-29.
8. H. El Kadi. Modeling the mechanical behavior of fiber reinforced polymeric composite materials using artificial neural networks — a review. Compos. Struct., 73 (2006), pp. 1-23.

Prediction of the FRP fatigue stiffness degradation curve using ANN

Lupachev D.K., Turbin N.V.

MAI, Moscow, Russia

Fiber reinforced polymers (FRP) getting widely used as primary material in such industries as aerospace and machinery due to the light weight, superior mechanical properties and great corrosion resistance.

As a material used in primary structures it requires evaluation of fatigue data which requires multiple expensive experiments with different load cases, sample types, type of fibers/matrix and lay-ups.

In comparison with metals, composite materials have evident stiffness degradation property, which is vital to keep track of. At the same time, this property might be used in calculation of fatigue-life or for non-destructive check of a structure.

Due to the sophistication of fatigue type of damage it's quite challenging task to predict fatigue curves especially to predict curves of stiffness degradation in fiber reinforced composite materials.

Current work provides ANN (Artificial Neural Network) type of solution in prediction of fatigue stiffness degradation curves. This approach may reduce amount of experiments required and help to predict stiffness degradation curve based on previous data.

References:

1. W. Hwang, K.S. Han. Fatigue of composites fatigue modulus concept and life prediction. J. Compos. Mater., 20 (2) (1986), pp. 154-165.
2. Djamel Djeghader, Bachir Redjel. Weibull analysis of fatigue test in jute reinforced polyester composite material. Composites Communications, 17 (2020), pp. 123-128, 10.1016/j.coco.2019.11.016.
3. Hemanth Kumar, R.P. Swamy, Fatigue life prediction of glass fiber reinforced epoxy composites using artificial neural networks. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100812>.
4. B. Harris. Fatigue in Composite, vol. 3, CRC/WP (2003).
5. W. Johnson, B. Hillberry (Eds.), Probabilistic Aspects of Life Prediction, ASTM Int (2004).
6. Aleksander Muc. Fuzzy approach in modeling static and fatigue strength of composite materials and structures. Neurocomputing, 393 (2020), pp. 156-164, 10.1016/j.neucom.2018.12.094.
7. Anastasios P. Vassilopoulos, Efstratios F. Georgopoulos, Vasileios Dionysopoulos. Artificial neural networks in spectrum fatigue life prediction of composite materials. Int. J. Fatig., 27 (1) (2007), pp. 20-29.
8. H. El Kadi. Modeling the mechanical behavior of fiber reinforced polymeric composite materials using artificial neural networks — a review. Compos. Struct., 73 (2006), pp. 1-23.

Усовершенствования конструкции головного обтекателя ракеты при возросших нагрузках

Маркин О.В.

ОНИИП Технология, г. Обнинск, Россия

Обтекатель сборный (ОС) — головная часть боевого снаряда, эксплуатируемого при высоких температурных нагрузках. Учитывая, что боевые снаряды постоянно эволюционируют в связи с необходимостью улучшения их тактико-технических характеристик, это приводит к увеличению температурных нагрузок на головную часть снаряда до экстремальных значений. Так же значимо возрастает уровень перегрузок, воздействующий на ОС. В связи с этим, возникает необходимость усовершенствования конструктивно-силовой схемы ОС таким образом, чтобы обеспечивался необходимый запас прочности ОС в условиях возросшей нагрузки.

Обтекатель сборный (далее ОС) состоит из керамической оболочки, металлического и композиционного шпангоутов. Данная конструкция обеспечивала необходимую прочность ОС при эксплуатации боевого снаряда, который имел тактико-технические характеристики предыдущего поколения. С увеличением требований к тактико-техническим характеристикам снарядов следующего поколения увеличиваются и нагрузки, действующие на головной обтекатель снаряда, в связи с чем конструкция ОС предыдущего поколения уже не обеспечивала необходимую прочность. Перед авторами данной работы стояла задача адаптировать конструкцию ОС к возросшим нагрузкам до достижения необходимого запаса прочности. По результатам данной работы есть основания полагать, что такие усовершенствования возможны путем замены некоторых металлических элементов ОС на элементы из композиционного материала.

Литература:

1. Рычков С.П. MSC.visualNASTRAN для Windows / Рычков С.П. — М.: НТ Пресс, 2004. — 552с.
2. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. — М.: ДМК, 2001. — 446с.
3. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. — Киев: Наук. думка, 1988. — 736с.

Improvements in the design of the rocket's head fairing under increased loads

Markin O.V.

OPRE Technologiya, Obninsk, Russia

The prefabricated fairing (PF) is the head part of a combat projectile operated at high temperature loads. Considering that, combat shells are constantly evolving due to the need to improve their tactical and technical characteristics, this leads to an increase in temperature loads on the head of the projectile to extreme values. The level of overloads affecting the PF also significantly increases. In this regard, there is a need to improve the structural and power scheme of the PF in such a way that the necessary margin of safety of the PF is provided in conditions of increased load.

The prefabricated fairing (hereinafter referred to as PF) consists of a ceramic shell, metal and composite frames. This design provided the necessary PF strength during the operation of a combat projectile, which had the tactical and technical characteristics of the previous generation. With the increase in the requirements for the tactical and technical characteristics of the next-generation projectiles, the loads acting on the projectile head fairing are also increasing, and therefore the design of the PF of the previous generation no longer provided the necessary strength. The authors of this work were faced with the task of adapting the PF design to increased loads until the necessary margin of safety was achieved. According to the results of this work, there is reason to believe that such improvements are possible by replacing some metal elements of the PF with elements made of composite material.

References:

1. Rychkov P.S. MSC.visualNASTRAN for Windows / Rychkov S.P. – M.: NT Press, 2004. – 552c.
2. Simkovic D.G. structural analysis in MSC/NASTRAN for Windows. – M.: DMK, 2001. – 446c.
3. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Handbook of strength of materials. - Kiev: Nauk. dumka, 1988. – 736s.

Влияние оценки накопления повреждений на прочность в металло-композитном стыке

Маскайкина А.А., Дудченко А.А.

МАИ, г. Москва, Россия

Целью данной работы является оценка влияния накопления повреждений на прочностные характеристики металлокомпозитных узлов в авиационных конструкциях при различном нагружении.

В данном исследовании используется микромеханический подход, в котором параметры модели определяются через микромеханические параметры, связанные с размером микроструктур, то есть с длиной и размером микротрещин. Это позволяет измерить уровень повреждения в композите с учетом соответствующего нагружения.

Для проверки результатов теоретического исследования используется математическая модель, созданная с помощью метода конечных элементов.

В результате данного исследования был получен алгоритм расчета приведенных жесткостей слоистого композита с учетом накопления повреждений в отдельных монослоях, влияющих на прочностные характеристики металло-композитных узлов в авиационных конструкциях. Данный алгоритм учитывает влияние текущего напряженного состояния на процесс деградации механических свойств и, следовательно, на процесс разрушения. Рассмотрена зависимость межслоевого расслоения от трещин в слое. Проведен также аналитический расчет методом конечных элементов на примере узла крепления вертолетной лопасти, сравнение результатов расчетов показало хорошее совпадение.

Литература:

1. Дудченко А.А., Лурье С.А. Моделирование процессов роста поврежденности и деградации механических свойств слоистых композитов. Москва, Изд-во МАИ, 2019, 160 с.
2. Larionova A.A., Dudchenko A.A. Design and analysis of the strength and durability of metal composite assemblies of aircraft structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 934, art. ID 012044; Advances in Composite Science and Technology (ACST 2019), 20–21 November 2019.

3. Дудченко А.А. Расчет напряженно-деформированного состояния элементов авиационных, ракетных и машиностроительных конструкций из композиционных материалов. Москва, НПУ «Федеративная информационная система», 2013, 232 с.

4. Маскайкина А.А., Дудченко А.А. Алгоритм расчета накопления повреждений на примере узла крепления вертолетной лопасти. Инженерный журнал: наука и инновации, 2021, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-7-2093>

The effect of damage accumulation assessment on strength in a metal-composite joint

Maskaykina A.A., Dudchenko A.A.

MAI, Moscow, Russia

The purpose of this work is to assess the effect of damage accumulation on the strength characteristics of metal composite components in aircraft structures under various loads.

In this study, a micromechanical approach is used, in which the model parameters are determined through micromechanical parameters related to the size of microstructures, that is, with the length and size of microcracks. This makes it possible to measure the level of damage in the composite, taking into account the corresponding loading.

To verify the results of the theoretical study, a mathematical model created using the finite element method is used.

As a result of this study, an algorithm was obtained for calculating the reduced stiffness of a layered composite, taking into account the accumulation of damage in individual monolayers that affect the strength characteristics of metal-composite components in aircraft structures. This algorithm takes into account the influence of the current stress state on the process of degradation of mechanical properties and, consequently, on the process of destruction. The dependence of interlayer stratification on cracks in the layer is considered. An analytical calculation by the finite element method was also carried out on the example of a helicopter blade attachment unit, a comparison of the calculation results showed a good match.

References:

1. Dudchenko A.A., Lurie S.A. Modeling of the processes of damage growth and degradation of mechanical properties of layered composites. Moscow, MAI Publishing House, 2019, 160 p.

2. Larionova A.A., Dudchenko A.A. Design and analysis of the strength and durability of metal composite assemblies of aircraft structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 934, art. ID 012044; Advances in Composite Science and Technology (ACST 2019), 20–21 November 2019.

3. Dudchenko A.A. Calculation of the stress-strain state of elements of aviation, rocket and machine-building structures made of composite materials. Moscow, NPU "Federal Information System", 2013, 232 p.

4. Maskaykina A.A., Dudchenko A.A. Algorithm for calculating damage accumulation on the example of a helicopter blade attachment unit. Engineering Journal: Science and Innovation, 2021, issue 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-7-2093>.

Собственные нелинейные колебания тонких прямоугольных композитных панелей несимметричной структуры

Митрофанов О.В., Гавва Л.М., Осман Мазен

МАИ, г. Москва, Россия

Панели современных конструкций самолетов малой и средней грузоподъемности в соответствии с существующей классификацией, как правило, являются тонкостенными. Особенностью оценки несущей способности и собственных колебаний является необходимый учет геометрически нелинейных соотношений. Объектами исследований данной работы являются тонкие прямоугольные композитные панели несимметричной структуры, которая может являться следствием применения ремонта основных силовых или вторичных элементов конструкции. Целью работы является оценка собственных нелинейных колебаний тонких композитных панелей несимметричной структуры. Исходные соотношения кроме традиционных мембранных и изгибных жесткостей учитывают смешанные жесткости. Записанная исходная система уравнений сведена к геометрически нелинейным уравнениям совместности деформаций и нелинейному уравнению типа Кармана [1]. Представлены

уравнения, учитывающие возможную начальную погибь. В работе рассмотрены прямоугольные панели для вариантов шарнирного и жесткого опирания. Решение задач проведено методом Бубнова-Галеркина. Сначала из уравнения совместности деформаций определены функции напряжения, а затем при использовании уравнения Кармана записано нелинейное уравнение, включающее соответствующие динамические члены второй производной по времени. При рассмотрении линейной задачи получены определения собственных частот композитной панели при малых колебаниях. Далее при рассмотрении задачи нелинейных колебаний для панелей со свободно смещающимися кромками после интегрирования получено уравнение для определения собственных частот тонких панелей несимметричной структуры. Итоговые аналитические соотношения позволяют проводить оценку учета геометрической нелинейности. Практической значимостью работы является возможность рассмотрения нелинейных колебаний тонкостенных элементов вторичных конструкций с учетом несимметричной структуры. В качестве примеров могут быть рассмотрены ремонтные варианты панелей обтекателей различного назначения.

Литература:

1. Митрофанов, О. В. Актуальные задачи и основные соотношения для исследований композитных панелей несимметричной структуры с учетом геометрической нелинейности // Естественные и технические науки. – 2021. – № 2(153). – С. 140-144. – DOI 10.25633/ETN.2021.02.06.

Natural nonlinear oscillation of thin rectangular composite panels of non-symmetric structure

Mitrofanov O.V., Gavva L.M., Osman Mazen
MAI, Moscow, Russia

Modern light and midmarket aircraft structure panels according to classification are generally thin-wall. Load-bearing capacity and natural oscillation estimation peculiarity is necessary consideration of geometrically nonlinear correlations. Thin rectangular composite panels of non-symmetric structure, which may be caused by PSE and secondary structural elements repair are inspected in this paper.

Purpose of this paper is estimation of natural nonlinear oscillation of thin composite panels of non-symmetric structure. Initial correlations except for traditional membrane and bending stiffness consider combined stiffness. Initial equation system is reduced to geometrically nonlinear equations of strain compatibility and nonlinear von Karman equation. Equations considering possible initial deflection are shown in this paper. It examines hinge and rigidly supported rectangular panels. The problem is solved using Bubnov-Galerkin method. At first, stress function is obtained based on equation of strain compatibility, then nonlinear equation including corresponding dynamic terms of second order derivative in time using von Karman equation [1]. When examining linear problem composite panel natural oscillation definition is obtained for small oscillation. Further on when examining problem of nonlinear oscillation of non-symmetric structure panel with free edges an equation for thin panels natural oscillation definition is obtained after integration. Final analytical correlations let us estimate consideration of geometric nonlinearity. This paper practical significance lies in non-symmetric secondary structures thin-wall elements nonlinear natural oscillation definition, for example, for panels of different fairings.

References:

1. Mitrofanov O.V. (2021) Current problems and basic relations for the study of composite panels of an asymmetric structure taking into account geometric nonlinearity // Natural and Technical Sciences. 2(153). pp. 140-144. – DOI 10.25633/ETN.2021.02.06.

Проектирование квадратных подкреплённых композитных стенок при сдвиге с учетом обеспечения устойчивости

Митрофанов О.В., Осман Мазен, Кайков К.В.
МАИ, г. Москва, Россия

Для стенок лонжеронов региональных самолетов не допускается потеря устойчивости при расчетном уровне нагружения [1-3]. Объектами исследования данной работы являются подкреплённые ребрами стенки с габаритными размерами близкими к квадратной форме и

изготовленными из композитных материалов. При постановке задачи учитывается, что стенки лонжеронов могут быть нагружены касательными потоками и вторичными сжимающими усилиями, возникающими от изгиба крыла. Целью работы являлась разработка аналитической прикладной методики оптимального проектирования, которая могла бы быть использована на этапах раннего проектирования для оценки приведенных толщин стенок нервюр и лонжеронов. Для определения оптимальных параметров подкрепленных стенок рассмотрена задача оптимального проектирования с учетом ограничений по местной устойчивости обшивки (которая является прямоугольной ортотропной панелью) и общей устойчивости стенки с ребрами (которая является квадратной конструктивно-ортотропной панелью). Методология проектирования равноустойчивых панелей представлена в работе [4]. Предполагается, что структура композитной стенки состоит из обшивки и частых I-образных подкрепляющих ребер. Соотношения для оценки общей устойчивости при сжатии и сдвиге соответствуют конструктивно – ортотропным панелям, для которых применима гипотеза осреднения жесткостей. Указанные выражения учитывают особенности общей квадратной формы стенки. Аналитическая задача оптимизации сведена к минимизации функции одной переменной, которой является высота ребра к шагу подкрепления. Приведены прикладные методики определения оптимальных параметров при сжатии, сдвиге и комбинированном нагружении. Также рассмотрен вариант гофрового заполнителя трубчатой структуры. На основе полученных соотношений проведены исследования рационального армирования $\pm\varphi^\circ$ элементов стенки и даны рекомендации по соотношениям слоев при стандартной укладке $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ исходя из равенства мембранных жесткостей.

Литература:

1. Проектирование самолетов / под ред. М.А. Погосяна. -М.: Инновационное машиностроение. 2020. -864 с.
2. Дзюба А.С., Дударьков Ю.И., Замула Г.Н., Митрофанов О.В., Мохов В.Ф., Пименов А.В., Цыганков В.Я. Статические испытания регионального самолета RRJ-95. Труды ЦАГИ. 2011. № 2698. -С. 88-96.
3. Больших А. А., Еремин В. П. Применение метода параметрической оптимизации в задачах проектирования пассажирских авиалайнеров // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2020. – № 10(106). – С. 3. – DOI 10.18698/2308-6033-2020-10-2022.
4. Митрофанов О.В. Проектирование несущих панелей авиационных конструкций по критическому состоянию. -М.: Изд-во МАИ, 2020. -160 с.

Stiffened composite quadratic walls design with shear providing stability

Mitrofanov O.V., Osman Mazen, Kaikov K.V.

MAI, Moscow, Russia

For regional aircraft spar webs buckling is not acceptable with ultimate loading level [1-3]. This paper research objects are composite rib-stiffened webs of dimensions close to square shape. Problem statement considers that spar webs may be loaded with tangential flows and secondary compressive forces due to the wing bending. This paper purpose is development of analytical applied method for optimal design, which can be used at early design stage for estimation of ribs and spars web thickness. In order to define optimal parameters of stiffened webs optimal design problem is examined considering constraints in skin (rectangular orthotropic panel) local stability and global stability of the web with ribs (square structurally orthotropic panel). The methodology of designing equidistant panels is presented in [4]. It is assumed that composite web structure consists of the skin and frequent I-shaped stiffening ribs. Correlations for global stability estimation in case of compression and shear correspond to structurally orthotropic panels, for which stiffness averaging hypothesis is used. Indicated expressions consider peculiarities of web general square shape. Optimization analytical problem is reduced to minimization of function of one variable, which is correlation of rib height to stiffening pitch. Applied methods for optimal parameters definition in case of compression, shear and combined loading are shown. Besides variant of corrugated filler of tube structure is examined. Based on obtained correlations rational web elements reinforcement $\pm\varphi^\circ$ was researched and correlations of lays with standard layout $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ are recommended based on membrane stiffness equality.

References:

1. Aircraft design / edited by M.A. Poghosyan. -M.: Innovative Mechanical Engineering. 2020. - 864p.
2. Dzuba A.S., Dudarkov Yu.I., Zamula G.N., Mitrofanov O.V., Mokhov V.F., Pimenov A.V., Tsygankov V.Ya. Static tests of the regional aircraft RRJ-95. Proceedings of TsAGI. 2011. No. 2698. -pp. 88-96.
3. Bolshikh A.A, Eremin V.P. (2020). Method of parametric optimization in the problems of passenger airliner design. Engineering Journal: Science and Innovation. 10.18698/2308-6033-2020-10-2022.
4. Mitrofanov O. V. Design of Carrying Panels of Aircraft Structures by Post-buckling Condition. -Moscow: MAI, 2020. -160 p.

Оптимальное проектирование сжатых тонких композитных панелей по закритическому состоянию с учетом ограничений по усталости

Митрофанов О.В.

МАИ, г. Москва, Россия

При проектировании верхних тонких композитных панелей кессона крыла и нижних панелей фюзеляжа самолета малой авиации допускается потеря устойчивости от сжимающих усилий при нагрузках ниже эксплуатационного уровня [1-2]. Предметом исследований данной работы являются гладкие ортотропные прямоугольные панели при шарнирном опирании и продольном сжатии. Для определения оптимальных параметров панелей представлена методика оптимального проектирования, основанная на условии рассмотрения нескольких различных уровней нагружения. На первом уровне статического нагружения учитываются ограничения по устойчивости. Отмечено, что нагрузки первого уровня нагружения не обязательно совпадает с эксплуатационными нагрузками. На последующих уровнях допускается закритическое поведение панелей при нагружении при некоторых полетах квазислучайной программы усталостного нагружения, которая включает несколько типов полетов с характерными повторяемостями и уровнями амплитуды нагружения. Для задачи оптимального проектирования в этом случае в качестве переменных используются толщина и ширина панели. При рассмотрении задачи определения напряженно-деформированного состояния на втором уровне нагружения использованы геометрически нелинейные соотношения и рассматривается аналитическое решение задачи методом Бубнова-Галеркина. Задача оптимального проектирования ортотропной панели при ограничениях по устойчивости и усталости при закритическом поведении сведена к решению системы двух уравнений. При записи соотношений для второго уровня нагружения предложено уточнение методологии проектирования по закритическому состоянию, включающее уточнение нагрузок и допускаемых напряжений, в том числе, по усталостной прочности. Практическая значимость работы заключается в возможности определения оптимальных параметров панелей и выработки рекомендаций на ранних этапах проектирования с учетом различных уровней нагружения.

Литература:

1. Митрофанов О.В. Проектирование несущих панелей авиационных конструкций по закритическому состоянию. -М.: Изд-во МАИ, 2020. -160 с.
2. Митрофанов О.В. Об уточнении редуционных коэффициентов нижних панелей фюзеляжа с учетом обеспечения несущей способности и усталостной долговечности // Естественные и технические науки. – 2017. – № 12(114). – С. 223-225.

Compressed panels optimal design taking constraint of stability and fatigue in postbuckling state into account

Mitrofanov O.V.

MAI, Moscow, Russia

When designing light aircraft wing box thin upper composite panels buckling is acceptable due to compressive force with loads below limit level [1-2]. This paper researches smooth orthotropic rectangular hinge supported and longitudinally compressed panels. In order to define panels optimal parameters optimal design method based on consideration of two different loading levels is shown. At the first level of static loading stability constraints are considered. It is noted that first loading

level loads do not have to coincide with limit loads. At the second loading level panels postbuckling behavior is acceptable due to loading in some flights of fatigue loading quasi-random program consisting of several flight types with typical loading amplitude and frequency of occurrence levels. In this case panel thickness and width are used as variables for optimal design problem. Geometrically nonlinear correlations are used at the second loading level when considering mode of deformation definition problem, the problem is analytically solved using Bubnov-Galerkin method. Orthotropic panel optimal design problem with stability and fatigue constraints in case of postbuckling behavior is reduced to solution of two equations system. For correlations of the second loading level design method by postbuckling state is improved, to be more exact, loads and fatigue allowable stress are defined more precisely. This paper practical significance lies in panels optimal parameters definition and recommendations at an early design stage.

References:

1. Mitrofanov O.V. Design of Carrying Panels of Aircraft Structures by Post-buckling Condition. -Moscow: MAI, 2020. -160 p.
2. Mitrofanov O.V. (2017) On improvement of fuselage lower panels reduction factors taking into account load-bearing capacity and fatigue endurance assurance // Natural and Technical Sciences. – № 12(114). – pp. 223-225.

Определение оптимальных параметров сжатых композитных панелей при обеспечении устойчивости и прочности при закритическом поведении с учетом жесткого опирания

Митрофанов О.В., Осман Мазен

МАИ, г. Москва, Россия

Для тонких верхних обшивок кессона легкого самолета допускается потеря устойчивости при действии нагрузок, близких эксплуатационному уровню. Целью работы является определение сжатых оптимальных параметров прямоугольных композитных панелей при жестком опирании по длинным сторонам. Переменными параметрами в рассматриваемой задаче оптимизации являются толщина и ширина обшивки, что имеет практическую значимость на ранних этапах проектирования при проработке конструктивно-силовой схемы кессона крыла. Для рассматриваемой задачи приняты жесткие граничные условия опирания. Особенности постановки задачи, которые заключаются в следующем. Во-первых, при проектировании рассматривается два уровня нагружения. На первом уровне нагружения не допускается потеря устойчивости тонких панелей. На втором уровне нагружения при допустимости закритического поведения должно происходить разрушение панели по условиям прочности с учетом геометрически нелинейного поведения. Во-вторых, для определения оптимального веса конструкции использовано условие реализации минимальных запасов по устойчивости при первом уровне нагружения и по статической прочности при проектировании по закритическому состоянию при втором уровне нагружения. Запасы по устойчивости и по прочности на соответствующих уровнях нагружения должны быть равны единице. Нагрузки при указанных уровнях нагружения не обязательно должны совпадать с эксплуатационным и расчетным уровнями нагружения и должны определяться разработчиком воздушного судна исходя из специальных расчетных условий, согласованных с авиационными властями. Отмечено, что при определении оптимальных параметров должны быть использованы решения геометрически нелинейных задач и методология проектирования по закритическому состоянию [1-3]. Для тонких обшивок в работе учитываются мембранные напряжения, возникающие при потере устойчивости. Таким образом, рассматриваемая аналитическая задача оптимального проектирования сведена к решению двух уравнений относительно двух неизвестных при обеспечении условий устойчивости и прочности на двух уровнях нагружения. В работе получены аналитические соотношения, в том числе, нелинейное уравнение относительно толщины панели, указанных уровней сжимающей нагрузки и предельных по прочности напряжений, достигаемых при расчетных нагрузках.

Литература:

1. Митрофанов О.В. Прикладное проектирование панелей крыла минимального веса из композитных материалов с учетом закритического поведения обшивки // Вестник МАИ. Том 9. 2002г. №1. –С.34-41.

2. Mitrofanov O. Post-Buckling State Estimation and Load-Bearing Composite Panels Design for Compression and Shear. AIP Conference Proceedings 2125, 030059 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5117441>.

3. Митрофанов О.В. Проектирование несущих панелей авиационных конструкций по закритическому состоянию. -М.: Изд-во МАИ, 2020. -160 с.

Compressed panels optimal parameters definition providing stability and strength with postbuckling behavior taking rigid support into account

Mitrofanov O.V., Osman Mazen

MAI, Moscow, Russia

For light aircraft wing box thin upper skin, buckling is acceptable due to loads close to limit level. This paper purpose is to define compressed rectangular composite panels optimal parameters for rigid support by long sides. Variable parameters of the considered optimization problem are skin width and thickness, which is of considerable practical importance at early design stage when developing wing box structural layout. For the considered problem, rigid support boundary conditions are assumed. Shown below are the problem statement peculiarities. At first, two loading levels are considered in design. At the first loading level thin panels buckling is not acceptable. At the second loading level with acceptable postbuckling behavior panel shall fail by strength conditions considering geometrically nonlinear behavior. Secondly, in order to define optimal structure weight minimal stability margin condition is used at the first loading level and minimal static strength margin condition is used for the second loading level when designing by postbuckling state. Stability and strength margins at corresponding loading levels shall equal one. Loads of the above mentioned loading levels do not have to coincide with limit and ultimate loading levels and shall be defined by the developer of the aircraft based on special design conditions agreed upon with aviation authorities. It is noted that when defining optimal parameters one shall use geometrically nonlinear problem solutions and method of design based on postbuckling state [1-3]. For thin skins membrane stress due to buckling is taken into account in this paper. Thus considered analytical problem of optimal design is reduced to solution of two equations in two unknown variables providing stability and strength conditions at two loading levels. Analytical correlations including nonlinear equation in panel thickness, above mentioned compressive load and critical stress achieved with ultimate loads are obtained in this paper.

References:

1. Mitrofanov O.V. (2002) Applied design of minimum weight wing panels made of composite materials taking into account the supercritical behavior of the skin Vestnik MAI 9 (1) pp 34–41

2. Mitrofanov O. (2019) Post-Buckling State Estimation and Load-Bearing Composite Panels Design for Compression and Shear. AIP Conference Proceedings 2125, 030059; <https://doi.org/10.1063/1.5117441>

3. Mitrofanov O.V. Design of Carrying Panels of Aircraft Structures by Post-buckling Condition. -Moscow: MAI, 2020. -160 p.

Численно-экспериментальный анализ нелинейного напряженно-деформированного состояния композитных проушин в испытаниях на растяжение

Павлова С.А., Кишов Е.А., Куркин Е.И., Павлова С.А.

Самарский университет, г. Самара, Россия

На сегодняшний день при анализе напряженно-деформированного состояния композитных конструкций на практике широко применяются модели материала, описывающие линейную зависимость «напряжение-деформация». Данные модели обладают определенной чувствительностью при анализе напряженно-деформированного состояния таких зон конструкции, в которых преобладает существенное нагружение полимерного связующего. С практической точки зрения это приводит к необходимости усиления композитных конструкций в подобных зонах и, как следствие, увеличению массы конструкции в целом. Добиться снижения избыточной чувствительности можно, если при моделировании такого рода напряженно-деформированного состояния учитывать нелинейный характер деформирования компонентов композиционного материала.

В работе проводится численно-экспериментальный анализ возможности учёта упруго-нелинейного поведения полимерного композиционного материала на примере композитных проушин, нагруженных растяжением. Рассматривались три типоразмера проушин, выполненных из двух полимерных композиционных материалов, которые отличаются типом и поверхностной плотностью армирующего материала. Для проведения экспериментального анализа было изготовлено и испытано 3 партии по 10 образцов для каждого типа материала. Закрепление образцов в испытательной оснастке осуществлялось по торцевой кромке, а нагружение – путем линейного перемещения цилиндрического нагружающего элемента, вставленного в проушину. По результатам испытаний получены диаграммы «сила-перемещение» для трёх типоразмеров проушин каждого из рассматриваемых материалов, которые в дальнейшем использовались в качестве исходных данных при численном моделировании.

Численное моделирование композитных проушин осуществлялось с использованием оболочечных конечных элементов типа SHELL-181 в среде CAE-системы ANSYS. Для прогнозирования нелинейного напряженно-деформированного состояния проушин использовалась специальная разработанная программа NLComp, предназначенная для расчёта композитных конструкций с учётом нелинейного поведения материалов. В конечно-элементных моделях условия закрепления и нагружения задавались наиболее приближенные к реальным условиям эксперимента. Оценка точности конечно-элементных моделей проушин трёх типов осуществлялась путем вычисления относительных отклонений численных и экспериментальных значений реакций в опоре на каждом шаге нагружения. В результате средние значения отклонений составили: 16% – для проушин 1 типоразмера, 11% – для проушин 2 типоразмера и 8% – для проушин 3 типоразмера.

Полученные результаты численно-экспериментального исследования композитных проушин показывают эффективность разработанной методики расчёта композитных конструкций с учётом нелинейного поведения материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту FSSS-2020-0016.

Numerical and experimental analysis of nonlinear stress-strain state of composite attachment lug in tension tests

Pavlov A.A., Kishov E.A., Kurkin E.I., Pavlova S.A.
Samara University, Samara, Russia

In advanced practice the stress-strain state analysis of composite structures widely uses models of composite material models that describe the linear “stress-strain” correspondence. These models have a certain sensitivity in the stress-strain state analysis of such structural areas, where the significant loading of the polymer matrix prevails. In practice, this leads to the need to strengthen composite structures in such areas and, as a consequence, to increase the mass of the structure as a whole. It is possible to achieve a reduction in excess sensitivity if, when modeling such a stress-strain state, the nonlinear nature of the deformation of the components of the composite material is taken into account.

The paper presents a numerical-experimental analysis of the possibility of taking into account the elastic-nonlinear behavior of a polymer composite material using the example of tensile-loaded composite lugs. Three standard sizes of lugs made of two polymer composite materials, which differ in the type and surface density of the reinforcing material, were considered. For the experimental analysis, 3 batches of 10 samples for each type of material were manufactured and tested. The specimens were fixed in the test fixture along the end edge, and the loading was carried out by linear displacement of the cylindrical loading element inserted into the lug. According to the test results, force-displacement diagrams were obtained for three standard sizes of lugs for each of the materials under consideration, which were subsequently used as input data in numerical modeling.

Numerical modeling of composite lugs was carried out using shell finite elements of the SHELL-181 type in the environment of the ANSYS CAE system. To predict the nonlinear stress-strain state of the lugs, a specially developed NLComp program was used, designed to calculate composite structures taking into account the nonlinear behavior of materials. In finite element models, the conditions of fixation and loading were set as close as possible to the real conditions of the

experiment. The assessment of the accuracy of the finite element models of the lugs of three types was carried out by calculating the relative deviations of the numerical and experimental values of the reactions in the support at each loading step. As a result, the average deviations were: 16% – for lugs of 1 standard size, 11% – for lugs of 2 standard sizes and 8% – for lugs of 3 standard sizes.

The obtained results of a numerical-experimental study of composite lugs show the effectiveness of the developed method for calculating composite structures taking into account the nonlinear behavior of composite materials.

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project FSSS-2020-0016.

Возможности использования углеродного материала в конструкции теплоотводящих панелей холодильника-излучателя космического аппарата

Ромашова М.О.

МАИ, г. Москва, Россия

Отвод тепла от космического аппарата в условиях космоса может осуществляться лишь излучением. Назначение холодильников-излучателей любой схемы сводится к отводу тепла от различных систем космического корабля (энергетической установки, систем охлаждения и жизнеобеспечения) и рассеянию этого тепла в космическом пространстве посредством излучения. В зависимости от назначения указанных систем и величины отводимой мощности, уровень рабочих температур излучателей и площадь излучающей поверхности могут колебаться в широких пределах. Композиционные материалы имеют определенное преимущество по сравнению с наиболее подходящими по своим физическим свойствам металлическими сплавами. Прогресс в системах охлаждения космических аппаратов является очень востребованной разработкой в отрасли космической энергетики. Но при создании данных систем возникают дополнительные проблемы, в частности, связанные с преобразованием тепловой энергии в электрическую: создание холодильника-излучателя с необходимой надежностью и массогабаритными характеристиками и малогабаритного теплообменника-рекуператора, обеспечивающего достаточно высокий термодинамический КПД установки. Большая часть углеродных материалов дает возможность снижения веса изделия на 10-50% в зависимости от конструкции и, соответственно, позволяет сократить расход рабочего тела. Мотивацией к работе по изучению возможности замещения металлических излучающих поверхностей (холодильника-излучателя) на углеродный композиционный материал является широкое применение в космической технике композиционных материалов. В конструкционном плане панели излучателя выполняются в виде комплекса трубчатых элементов с целью интенсификации лучистого теплообмена. Одной из основных задач было обеспечение контакта между углеродным материалом и тепловой трубой, выполненной, как правило, из нержавеющей стали. Такое соединение должно отвечать требованию обеспечения надежной механической связи между трубкой и углеродным материалом во всем рабочем диапазоне температур, при этом обладать минимальным термическим сопротивлением. В результате, в случае использования в качестве излучающей поверхности углепластика или углерод-углеродного композиционного материала может иметь место отрыв от тепловой трубы и, как следствие, нарушение теплового контакта. Одним из путей решения этого вопроса может быть использование в качестве излучающей поверхности углеродной ткани. Таким образом, в работе будет рассмотрено конструктивно-технологическое решение, обеспечивающее соединение теплопередающих устройств с углеродным полотном с необходимой прочностью и минимальными тепловыми потерями.

Possibilities of using carbon material in the construction of heat-removing panels of the refrigerator-radiator of the spacecraft

Romashova M.O.

MAI, Moscow, Russia

Heat removal from the spacecraft in space conditions can only be carried out by radiation. The purpose of radiator refrigerators of any scheme is to remove heat from various spacecraft systems (power plant, cooling and life support systems) and dissipate this heat in outer space through

radiation. Depending on the purpose of these systems and the amount of power output, the level of operating temperatures of the emitters and the area of the radiating surface can vary widely. Composite materials have a certain advantage in comparison with the most suitable metal alloys in their physical properties. Progress in spacecraft cooling systems is a very popular development in the space energy industry. But when creating these systems, additional problems arise, in particular, related to the conversion of thermal energy into electrical energy: the creation of a radiator refrigerator with the necessary reliability and mass-dimensional characteristics and a small heat exchanger-recuperator that provides a sufficiently high thermodynamic efficiency of the installation. Most of the carbon materials make it possible to reduce the weight of the product by 10-50%, depending on the design and, accordingly, reduces the consumption of the working fluid. The motivation for the work on the study of the possibility of replacing metal radiating surfaces (refrigerator-radiator) with carbon composite material is the widespread use of composite materials in space technology. Structurally, the radiator panels are made in the form of a complex of tubular elements in order to intensify radiant heat exchange. One of the main tasks was to ensure contact between the carbon material and the heat pipe, usually made of stainless steel. Such a connection must meet the requirement of ensuring a reliable mechanical connection between the tube and the carbon material over the entire operating temperature range, while having a minimum thermal resistance. As a result, in the case of using carbon fiber or carbon-carbon composite material as a radiating surface, there may be a separation from the heat pipe and, as a consequence, a violation of thermal contact. One of the ways to solve this issue may be to use carbon fabric as a radiating surface. Thus, the paper will consider a constructive and technological solution that ensures the connection of heat transfer devices with a carbon web with the necessary strength and minimal heat losses.

Расчётно-экспериментальная методика определения комплекса теплофизических свойств полимерных композитных материалов

Сапожников С.Б., Жихарев М.В., Олиненко Н.А., Лешков Е.В.

ЮУрГУ, г. Челябинск, Россия

Данная работа посвящена разработке расчётно-экспериментальной методики определения комплекса теплофизических свойств полимерных композитных материалов для дальнейших термографических исследований. Необходимым условием является знание компонент тензора теплопроводности ортотропного материала, теплоёмкости и коэффициента теплоотдачи в воздух от поверхности композита. Эти величины в справочниках практически отсутствуют. В рамках данной работы были экспериментально определены некоторые значения теплопроводности в разных направлениях и теплоемкости тканевых стекло- и углепластиков. Однако определение теплопроводности композитов в плоскости стандартными приборами невозможно. Для этого была разработана специальная лабораторная установка и экспериментально определены тепловые поля в образце при нагреве от источника постоянной мощности, построены графики скорости выхода на стационарный режим. Полученные экспериментальные данные послужили основой для построения численных моделей в пакете ANSYS Workbench и дальнейшего расчета коэффициента теплоотдачи вертикальной поверхности в воздух, значение которого в литературных источниках приводится со значительным разбросом (коэффициенты варьируются от 5 до 15 Вт/м²·град). Из термического расчета решения обратной задачи были найдены значения теплопроводности углепластика, которые не удалось определить в эксперименте.

Computational and experimental methods for determining the complex of thermophysical properties of polymer composite materials

Sapozhnikov S.B., Zhikharev M.V., Olenenko N.A., Leshkov E.V.

SUSU, Chelyabinsk, Russia

This work is devoted to the development of a computational and experimental technique for determining the complex of thermophysical properties of polymer composite materials for further thermographic studies. A prerequisite is knowing the thermal conductivity tensor components of orthotropic material, the heat capacity and the heat transfer coefficient to air from the composite surface. These values are practically absent in reference books. As part of this work, some values of thermal conductivity in different directions and heat capacity of glass fiber and carbon fiber

reinforced plastics were experimentally determined. However, it is impossible to determine the thermal conductivity of composites in the plane using standard instruments. For this, a special laboratory setup was developed and the thermal fields in the specimen were experimentally determined when heated from a constant power source. Graphs of the rate of reaching the stationary mode were plotted. The obtained experimental data served as the basis for constructing numerical models in the ANSYS Workbench package and further calculation of the heat transfer coefficient of the vertical surface into the air, the value of which in the literature is given with a significant scatter (coefficients vary from 5 to 15 W/m²·deg). Thermal calculation of the inverse problem solution made it possible to determine the values of the thermal conductivity of CFRP, which could not be determined in the experiment.

Использование генетического алгоритма в задачах идентификации параметров нелинейных моделей короткоармированного композиционного материала

Спирина М.О., Куркин Е.И.

Самарский университет, г. Самара, Россия

Композиционные материалы, армированные короткими высокопрочными волокнами – перспективный материал для создания конструкций аэрокосмического назначения сложной формы, таких как кронштейнов навески, окантовок иллюминаторов, лопаток вентилятора газотурбинного двигателя. Жесткость и прочность короткоармированных композитов зависит от ориентации армирующих волокон и может быть описана в каждой точке конструкции с помощью нелинейной модели механических характеристик анизотропного материала. В работе рассматривается вопрос построения такой модели и идентификации ее параметров в системе Matlab на основе генетического алгоритма.

Модель анизотропии механических характеристик короткоармированного композита основана на работах Мори-Танка и Тандона, Венга, обобщающих исследования Эшелби. Основной вклад в нелинейное поведение композиционного материала может быть описан нелинейной моделью связующего. Для описания нелинейности механических характеристик связующего используются степенная, экспоненциальная и линейно-экспоненциальная модели законов упрочнения. Модуль упругости и коэффициент Пуассона связующего определяются на основе зависимостей параметров Ламе: пластичность учитываться в изменении модуля сдвига, тогда как объемный модуль упругости остается постоянным.

Параметры модели композиционного материала определяются путем минимизации отклонений расчетных и экспериментальных графиков нагружения образцов материала по стандарту ISO 527, вырезанных из пластины под углами 0°, 45° и 90° к направлению литья. В качестве критерия оптимизации при определении параметров является среднеквадратичное отклонение между моделями и графиками эксперимента. По умолчанию все линии нагружения считаются равнозначными, однако, в случае необходимости, возможно задание приоритетов путем назначения весовых коэффициентов.

Построение модели материала и определение ее параметров проведено в системе Matlab. Для идентификации параметров используется генетический алгоритм, реализованный функцией `ga`, с возможностью параллелизации вычислений. В качестве примеров построены модели полиамида-6 армированного углеродными и стеклянными волокнами.

Построенные модели могут быть использованы при решении задач расчета напряженно-деформированного состояния и проектирования изделий из короткоармированных композиционных материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-79-10205.

Using the genetic algorithm in a short-reinforced composite material nonlinear models parameters identification problem

Spirina M.O., Kurkin E.I.

Samara University, Samara, Russia

Composite materials reinforced with short high-strength fibers are advanced material for creating complex-shaped aerospace structures, such as hinge brackets, window frames, and jet engine compression blades. The stiffness and strength of short-reinforced composites depends on the

orientation of the reinforcing fibers and can be described at each point of the structure using a nonlinear model of the mechanical characteristics of an anisotropic material. The paper considers the issue of building such a model and identifying its parameters in the Matlab system based on a genetic algorithm.

The model of anisotropy of the mechanical characteristics of a short-reinforced composite is based on the works of Mori-Tanka and Tandon, Weng which generalizes Eshelby's studies. The main contribution to the nonlinear behavior of a composite material can be described by a nonlinear binder model. To describe the nonlinearity of the mechanical characteristics of the binder power, exponential, and linear-exponential models of the hardening laws are used. The elastic modulus and Poisson's ratio of the binder are determined based on the dependences of the Lamé parameters: plasticity is taken into account in the change in the shear modulus, while the bulk modulus of elasticity remains constant.

The parameters of the composite material model are determined by minimizing the deviations of the calculated and experimental loading schedules of material samples according to the ISO 527 standard, cut from the plate at angles of 0°, 45° and 90° to the molding direction. The standard deviation between the models and the experimental graphs is used as an optimization criterion for determining the parameters. By default, all load lines are considered equal, but if necessary, it is possible to set priorities by assigning weight coefficients.

The construction of the material model and the determination of its parameters was carried out in the Matlab system. To identify the parameters, a genetic algorithm is used, implemented by the ga function, with the possibility of parallelization of calculations. As examples, models of polyamide-6 reinforced with carbon and glass fibers are constructed.

The constructed models can be used in solving problems of calculating the stress-strain state and designing products made of short-reinforced composite materials.

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 19-79-10205.

Механика разрушения полимерных композитов при наличии множественных расслоений различной формы под действием динамических нагрузок

¹Хомченко А.В., ²Медведский А.Л., ¹Мартыросов М.И., ²Дедова Д.В.

¹МАИ, ²ПАО «Корпорация «Иркут», г. Москва, Россия

³ЦАГИ, г. Жуковский, Россия

При создании техники в аэрокосмической отрасли большую роль играет весовая эффективность создаваемого летательного аппарата (ЛА). Для достижения поставленной цели необходимо постоянно совершенствовать применяемые конструкционные материалы, которые должны иметь характеристики не ниже традиционных. Популярность получили полимерные композиционные материалы (ПКМ), из которых, в том числе, изготавливаются силовые элементы конструкций ЛА (панели, лонжероны, нервюры кессонов крыла и оперения, и т.д.). При создании и эксплуатации таких элементов в них нередко возникают межслойные дефекты типа расслоений, которые негативно сказываются на прочностных и жесткостных характеристиках элемента конструкции. Чаще всего при моделировании межслойных дефектов типа расслоений принимают, что дефект имеет форму эллипса, круга или прямоугольника, но в общем случае дефект имеет произвольную форму.

В работе проводится численное исследование влияния расслоений на прочность и поведение слоистых элементов конструкций из полимерных композитов (углепластиков) при действии нестационарных воздействий. В качестве объектов рассматриваются: гладкие и подкрепленные пластины, цилиндрические панели и оболочки. Элементы конструкций выполняются из углепластиков на основе препрегов HexPly M21/34%/UD194/IMA (углеплата) и HexPly M21/40%/285T2/AS4C (углеткань), предназначенных для производства изделий по автоклавной технологии.

Предполагается, что в рассматриваемых элементах конструкций расположены множественные дефекты типа расслоений различной формы (эллипс, круг, произвольная форма) и размеров. В качестве внешних воздействий в исследовании рассматривается: действие нестационарных полей давлений (акустической природы, взрывная волна от

точечного источника), удары различными дискретными источниками (фрагмент ротора двигателя, фрагмент пневматика, жёсткие полусферические импакторы).

Задачи решаются численно с помощью метода конечных элементов в программном комплексе LS-DYNA (явная схема интегрирования). Определяются поля перемещений, напряжений и деформаций в слоях элементов конструкций в различные моменты времени. Определяются коэффициенты запаса прочности с помощью различных критериев разрушения для композитов (Hashin, Chang-Chang, Puck, LaRC), а также распределение давления на внешних поверхностях при действии взрывной волны. Оценивается влияние дефектов на их дальнейшее развитие при действии нагрузки, т.е. разрушение когезионной межслойной связи.

Fracture mechanics of polymer composites in the presence of multiple bundles of various shapes under the influence of dynamic loads

¹Khomchenko A.V., ³Medvedsky A.L., ¹Martirosov M.I., ²Dedova D.V.

¹MAI, ²Irkut Corporation, Moscow, Russia

³TsAGI, Zhukovsky, Russia

When creating equipment in the aerospace industry, the weight efficiency of the aircraft being created plays an important role. To achieve this goal, it is necessary to constantly improve the applied structural materials, which must have characteristics not lower than traditional ones. Polymer composite materials (PCM) have gained popularity, from which, among other things, power elements of aircraft structures are made (panels, spars, ribs of wing and tail caissons, etc.). When creating and operating such elements, interlayer defects of the type of bundles often occur in them, which negatively affect the strength and stiffness characteristics of the structural element. Most often, when modeling interlayer defects of the type of expansion, it is assumed that the defect has the shape of an ellipse, circle or rectangle, but in general, the defect has an arbitrary shape.

The paper presents a numerical study of the effect of stratifications on the strength and behavior of layered structural elements made of polymer composites (carbon fiber plastics) under the action of nonstationary influences. The following objects are considered: smooth and reinforced plates, cylindrical panels and shells. Structural elements are made of carbon fiber based on HexPly M21/34%/UD194/IMA (carbon fiber) and HexPly M21/40%/285T2/AS4C (carbon fiber) prepreps intended for the production of products using autoclave technology.

It is assumed that in the considered structural elements there are multiple defects of the type of bundles of various shapes (ellipse, circle, arbitrary shape) and sizes. The following external influences are considered in the study: the action of nonstationary pressure fields (of an acoustic nature, an explosive wave from a point source), impacts from various discrete sources (a fragment of the engine rotor, a fragment of pneumatics, rigid hemispherical impactors).

The problems are solved numerically using the finite element method in the LS-DYNA program complex (explicit integration scheme). The fields of displacements, stresses and deformations in the layers of structural elements at different time points are determined. The safety margin coefficients are determined using various fracture criteria for composites (Hashin, Chang-Chang, Puck, LaRC), as well as the pressure distribution on external surfaces under the action of an explosive wave. The influence of defects on their further development under the action of a load, i.e. the destruction of the cohesive interlayer bond, is estimated.

Методика топологической оптимизации геометрии подкрепляющих элементов плоских панелей

¹Чжо Й.К., ¹Соляев Ю.О., ¹Рабинский Л.Н., ²Евстратов С.В.

¹МАИ, г. Москва; ²РКК «Энергия», г. Королёв Россия

В работе предложена методика топологической оптимизации геометрии подкрепляющих элементов для плоских панелей, нагруженных сосредоточенными нагрузками. В основе методики используется численное решение задачи о деформациях панели переменной толщины. Параметром оптимизации является толщина панели, которая задана через фиктивную функцию плотности. Целевой минимизируемой функцией является полная энергия деформации плоские панели.

В результате решения задачи оптимизации определяется расположение ребер жесткости, обеспечивающих при собственной минимальной массе максимальное увеличение жесткости

конструкции. Преимуществами предлагаемого метода по сравнению со стандартными подходами топологической оптимизации являются пониженные требования к вычислительным ресурсам и возможность получения геометрии ребер жесткости, которые могут быть изготовлены, например, методом фрезерования. В работе исследована эффективность используемого подхода в сравнении с вариантами регулярного оребрения панелей. При этом показано, что для некоторых вариантов нагружения массовая эффективность оптимизированных конструкций может более чем в 2-5 раз превышать таковую в сравнении с лучшими вариантами регулярного оребрения. Рассмотрены варианты применения в численных расчетах как в классической теории пластин, так и в уточненной теории с учетом поперечного сдвига. Установлено, что в рассматриваемых задачах оптимизации с условиями минимизации полной энергии деформаций применение классической теории является более эффективным. Методика топологической оптимизации подкрепленных панелей, в которой для задания локальной толщины панели используется фиктивная функция плотности. Методика дает возможность получить оптимизированные варианты конструкций с наибольшей жесткостью. Оптимальные решения получены с использованием классической теории пластин, позволяющей получить приближенные оценки для оптимальной геометрии подкрепляющих элементов. Показана эффективность предложенной методики по сравнению с параметрической оптимизацией и возможность значительного превосходства найденных решений с криволинейной геометрией ребер жесткости по сравнению с панелями с регулярным оребрением.

Method of topological optimization of the geometry of supporting elements of flat panels

¹Kyaw Y.K., ¹Solyaev Y.O., ¹Rabinskiy L.N., ²Evstratov S.V.

¹MAI, Moscow; ²RSC "Energia", Korolev, Russia

The paper proposes a methodology for topological optimization of the geometry of supporting elements for flat panels loaded with concentrated loads. The technique based on the numerical solution of the problem on the deformations of a panel of variable thickness. The optimization parameter is the panel thickness, which is specified through a dummy density function. The target minimized function is the total energy of deformation of the flat panel.

As a result of solving the optimization problem, the location of the stiffening ribs that provide, at their own minimum mass, the maximum increase in the stiffness of the structure is determined. The advantages of the proposed method, as compared with the standard topological optimization approaches, are the reduced requirements to the computing resources and the possibility to obtain the geometry of stiffeners, which can be manufactured, for example, by milling. The paper investigates the effectiveness of the approach used in comparison with variants of regular finning of panels. It is shown that for some loading variants the mass efficiency of optimized structures may be more than 2-5 times higher than that for the best variants of regular ribbing. The variants of application in numerical calculations both in the classical plate theory and in the refined theory taking into account the transverse shear are considered. It is established that in considered optimization problems with conditions of minimization of total energy of deformations, application of classical theory is more effective. A technique for topological optimization of reinforced panels in which a dummy density function is used to specify the local panel thickness. The technique makes it possible to obtain optimized variants of structures with the highest stiffness. The optimal solutions are obtained using classical plate theory, which makes it possible to obtain approximate estimates for the optimal geometry of the reinforcing elements. The effectiveness of the proposed technique as compared to parametric optimization and the possibility of significant superiority of the found solutions with curvilinear geometry of stiffening ribs as compared to the panels with regular ribbing are shown.

Исследование влияния толщины защитного слоя на жесткость и прочность композитной панели с сетчатым подкреплением

Шелков К.А., Соляев Ю.О.

МАИ, г. Москва, Россия

В ходе работы была разработана конечно-элементная модель, представляющая собой панель, состоящую из композитной обшивки, сетчатого подкрепления в виде ребер,

выполненных из композиционного материала, защитного слоя из резинового материала и энергопоглощающего слоя.

С целью определения зависимости жесткости конструкции от толщины защитного слоя проводились статические расчеты шарнирно опертой панели под воздействием изгибающей нагрузки в виде распределённого давления. Толщина защитного слоя варьировалась от 0% до 20% от общей толщины панели. В результате расчетов были построены зависимости максимального прогиба панели от толщины защитного слоя.

Далее проводился динамический расчет в виде ударной нагрузки. Удар наносился в перекрестье ребер в центре панели, в ребро и зону между ребрами. Ударной нагрузки подвергались панели с различной толщиной защитного слоя (от 0% до 20% от общей толщины). По результатам анализа были определены минимальные энергии удара, приводящие к образованию повреждений в обшивке и ребрах, в зависимости от толщины защитного слоя. В качестве критерия разрушения композитных материалов применялся критерий предельных деформаций.

По результатам статического и динамического анализа была определена оптимальная толщина защитного слоя ребер сетчатой конструкции, обеспечивающая достаточную жесткость панели и позволяющая выдержать ударную нагрузку без разрушения ребер сетчатого подкрепления.

Литература:

1. Babaytsev A.V., Kornev Yu. V., Semenov N.A Modeling the stress-strain behavior of shungite particle-filled rubbers. *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. 2015. №6. С. 261-280.
2. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988ю – 272 с.: ил. – (Б-ка расчетчика/Ред кол.: Н.Н. Малинин (пред.) и др.).
3. Васильев В.В., Барынин В.А., Разин А.Ф., Петроковский. С.А., Халиманович. В.И. Анизотридные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение к космической технике. *COMPOSITE and NANOSTRUCTURES*. 2009. № 3. С. 38 - 50.
4. Olsson R. Analytical prediction of large mass impact damage in composite laminates. *Composites: Part A*. 2000. С. 1207-1215.
5. Barbero J. 2013 *Finite Element Analysis of Composite Materials Using Abaqus* (Taylor & Francis Group) p 406.
6. Kaddaha, M.A., Younes, R., Lafon, P. Homogenization Method to Calculate the Stiffness Matrix of Laminated Composites. *Eng* 2021, 2, 416-434.

Research on the influence of the thickness of the protective layer on the rigidity and strength of a composite panel with lattice stiffener

Shelkov K.A., Solyaev Y.O.

MAI, Moscow, Russia

In the course of the work, a finite element model was developed, representing a panel consisting of composite skin, mesh reinforcement in the form of ribs made of composite material, a protective layer made of rubber and an energy-absorbing layer.

In order to determine the dependence of the structural rigidity on the protective layer thickness, static calculations of the hinged panel under bending in form of distributed pressure were carried out. The thickness of the protective layer varied from 0% to 20% of the panel total thickness. As the calculations result, panel maximum deflection of the on the protective layer thickness curves were made.

Next, a dynamic calculation was carried out in the form of impact load. A series of impacts was made: in the crosshair of the ribs in the center of the panel; directly in the rib and in the area between the ribs. Panels with different thickness of the protective layer (from 0% to 20% of the total thickness) were subject to impact load. Based on analysis results, the minimum penetration energies, which lead to the formation of damage in the skin and rods, were determined, depending on the protective layer thickness. The ultimate strain criterion was used as a composite material failure criterion.

As the results of static and dynamic analysis, the optimal thickness of the lattice structure ribs protective layer was determined, providing sufficient rigidity of the panel and allowing it to withstand the impact load without ribs failure.

Исследование прочности и жесткости лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов с различными схемами армирования

Шипунов Г.С., Братусенко А.А.

ПНИПУ, г. Пермь, Россия

Создание лопатки спрямляющего аппарата (ЛСА) из полимерного композиционного материала (ПКМ) является комплексной научно-технической проблемой, решение которой невозможно без решения целого ряда задач механики деформируемого твердого тела. Спрямляющий аппарат представляет собой кольцевой набор профилированных лопаток, расположенных за рабочим колесом вентилятора и обеспечивающих выравнивание воздушного потока с целью уменьшения потерь в наружном контуре двигателя. С учетом большого количества лопаток на один двигатель снижение массы от применения ПКМ вместо металла может достигать порядка 8-10 кг. При проектировании лопатки из ПКМ запасы статической прочности при эксплуатационных нагрузках должны быть не менее 2,0, перемещения при этом должны быть не выше, чем у металлического аналога.

При выполнении работы сформулирована физическая и математическая постановка задачи расчета НДС ЛСА. Лопатка нагружается газодинамическими силами, распределенными на поверхности пера, закрепление осуществляется в обойме корпуса верхнего по плоскости верхней полки и корпуса нижнего по периметру нижней полки. Математическая постановка задачи соответствовала теории упругости анизотропного тела.

Сравнение полученных в результате расчета перемещений, нормальных и касательных напряжений в слоях для рассмотренных вариантов армирования лопатки показало, что минимальные перемещения наблюдаются в случае использования текстильного углепластика (препреговая технология). При использовании однонаправленных материалов максимальные нормальные напряжения поперек армирования в поверхностных слоях на кромке лопатки превышают предел прочности. Применение текстильных равнопрочных материалов обеспечивает выполнение критерия прочности со значительным запасом.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что однонаправленные материалы не удовлетворяют необходимым запасам прочности, и наиболее подходящим для дальнейших исследований является текстильный углепластик (препреговая технология) [3].

Заключение.

На основе анализа механических свойств выбраны современные материалы, обеспечивающие возможность создания лопатки спрямляющего аппарата, удовлетворяющие заданным требованиям. Сформулирована постановка задачи МДТТ и разработана модель для расчета напряженно-деформированного состояния, оценки прочности и жесткости композитной лопатки на макроскопическом и структурном уровнях.

Установлены зависимости между структурой армирования, особенностями деформирования и запасами прочности лопатки при эксплуатационных нагрузках, выбран наиболее рациональный материал и схема армирования для ее изготовления: текстильный углепластик $[0^\circ/45^\circ]$ (препреговая технология).

Благодарность.

Результаты получены при выполнении гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-2076.2021.4.

Литература:

1. Абовский Н.П., Андреев Н.П., Деруга А.П. Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек. – М.: Наука, 1978. – 287 с.
2. А.Н. Аношкин, А.А. Ташкинов. Прогнозирование несущей способности композитных фланцев корпусных деталей авиадвигателей. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 1998. – 101 с.
3. Шипунов Г.С. Расчетно-экспериментальная оценка статической прочности лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016.

Study of strength and rigidity of an outlet guide vane made of carbon fiber reinforced plastic with various reinforcement schemes

Shipunov G.S., Bratusenko A.A.

PNRPU, Perm, Russia

The creation of a straightening vane (LSA) made of a polymer composite material (PCM) is a complex scientific and technical problem, the solution of which is impossible without solving a number of problems in solid mechanics. The straightening device is an annular set of profiled blades located behind the fan impeller and ensuring equalization of the air flow in order to reduce losses in the external motor circuit. Taking into account the large number of blades per engine, the weight reduction from the use of PCM instead of metal can reach about 8-10 kg. When designing blades made of PCM, the reserves of static strength under operational loads should be at least 2.0, while the displacements should not be higher than that of a metal analogue.

When performing the work, the physical and mathematical formulations of the problem of calculating the SSS LSA were formulated. The blade is loaded by gas-dynamic forces distributed on the surface of the airfoil, the fixing is carried out in the casing of the upper body along the plane of the upper shelf and the lower body along the perimeter of the lower shelf. The mathematical formulation of the problem corresponded to the theory of elasticity of an anisotropic body.

Comparison of the displacements, normal and tangential stresses in the layers obtained as a result of the calculation for the considered options for reinforcing the blade showed that minimal displacements are observed in the case of using textile carbon fiber (prepreg technology). When using unidirectional materials, the maximum normal stresses across the reinforcement in the surface layers at the blade edge exceed the ultimate strength. The use of textile materials of equal strength ensures that the strength criterion is met with a significant margin.

Analyzing the results obtained, it can be concluded that unidirectional materials do not satisfy the necessary safety margins, and the most suitable for further research is textile carbon fiber (prepreg technology) [3].

Conclusion.

Based on the analysis of mechanical properties, modern materials have been selected that provide the possibility of creating a straightening vane that meets the specified requirements. The statement of the MDTT problem is formulated and a model is developed for calculating the stress-strain state, assessing the strength and stiffness of a composite blade at the macroscopic and structural levels.

Dependences between the structure of reinforcement, features of deformation and safety margins of a blade under operational loads are established, the most rational material and a reinforcement scheme for its manufacture are selected: textile carbon fiber [0°/45°] (prepreg technology).

Gratitude.

The results were obtained with the implementation of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists-candidates of sciences MK-2076.2021.4.

References:

1. Abovskiy N.P., Andreev N.P., Deruga A.P. Variational principles of the theory of elasticity and the theory of shells. - M.: Nauka, 1978. -- 287 p.
2. A. N. Anoshkin, A.A. Tashkinov. Forecasting the bearing capacity of composite flanges of aircraft engine body parts. - Perm: Publishing house of PSTU, 1998. -- 101 p.
3. Shipunov G.S. Computational and experimental evaluation of the static strength of a straightening apparatus blade made of polymer composite materials: Author's abstract. dis. Cand. tech. sciences. - Perm: PNRPU Publishing House, 2016.

Секция 2. Перспективные технологии переработки ПКМ для изготовления конструкций на их основе

Section 2. Advanced Technologies of Polymer Composite Materials (PCM) Processing for the Manufacture of Structures on Their Basis

Фталонитрильные связующие в качестве источника углерода для углерод-углеродных композиционных материалов

Алешкевич В.В., Булгаков Б.А., Афанасьева Е.С., Авдеев В.В.
МГУ, г. Москва, Россия

Постоянно развивающаяся аэрокосмическая промышленность определила необходимость в прочных, легких и термостабильных материалах. Углеродно-углеродные композитные материалы (УУКМ) позволили удовлетворить этот спрос. Из УУКМ изготавливаются тормозные диски самолётов и абляционные щиты спускаемых аппаратов. УУКМ представляет собой углеродное волокно в виде ткани, ленты или рубленного волокна, заключённого в углеродную матрицу. Такая структура не только обладает высокими механическими характеристиками, но и сохраняет химическую и термическую стабильность при высоких температурах.

Наиболее распространенным методом получения УУКМ является карбонизация полимерных композиционных материалов (ПКМ). Самыми распространенными связующими для исходных ПКМ стали фенолформальдегидные смолы из-за их низкой стоимости и высокой технологичности. Однако низкие значения остатков коксового остатка приводят к образованию большого количества пустот в материале после карбонизации. Поэтому для получения материала с желаемыми свойствами необходимо проведение от пяти до восьми циклов пропитки и карбонизации. Таким образом, получение готового материала может занять от трех до шести месяцев. Фталонитрильные связующие позволяют решить эту проблему за счет более высоких значений коксового остатка. В дополнение к высокой технологичности это делает фталонитрильные связующие перспективным источником углерода для производства УУКМ.

В данной работе получение УУКМ из ПКМ с фталонитрильной матрицей проводилось в два цикла. Образцы сначала подвергали карбонизации при температуре 1000°C по следующему режиму нагрева: 20°C → 450°C, 2°C/мин; 450°C → 700°C, 0.1°C/мин; 700°C → 1000°C, 1°C/мин; выдержка при 1000°C, 1ч. Последующая графитация проводилась по следующему режиму: нагрев RT → 1800°C, 6°C/мин; выдержка при 1800°C, 1ч. Плотность готовых образцов после составила 1,73 г/см³, прочность при межслоевом сдвиге — 14,1 МПа, прочность при сжатии — 139,8 МПа, коэффициент трения — 0,32–0,34.

Работа выполнена в рамках государственного задания Химического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Номер соглашения AAAA-A21-121011590086-0

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Phthalonitrile resins as a carbon source for carbon-carbon composites

Aleshkevich V.V., Bulgakov B.A., Afanasyeva E.S., Avdeev V.V.
MSU, Moscow, Russia

The developing aerospace industry has necessitated materials that are strong, lightweight and thermally stable. Carbon-carbon composite materials (C/Cs) satisfies this claim. Aircraft brake discs and ablation shields for descent vehicles are made of C/Cs. C/C is a carbon fiber in the form of a fiber, tape or chopped fiber, in a carbon matrix. This structure not only possesses high mechanical characteristics, but also maintains chemical and thermal stability at high temperatures.

The most common method for manufacturing C/Cs is the carbonization of carbon fiber reinforced polymers (CFRP). Phenol-formaldehyde resins have become the most common for initial CFRP due to their low cost and high processability. However, low char yield leads to a large number of voids in the material after carbonization. Therefore, to obtain a material with the desired properties, it is necessary to carry out 5-8 cycles of impregnation and carbonization. Thus, it can take up to six months to derive the final product. Phthalonitrile resins allow to solve this problem due to the higher char yield. In addition to high processability, this makes phthalonitrile resins a promising carbon source for C/Cs manufacturing.

In this work, the preparation of C/Cs from CFRP with a phthalonitrile matrix was carried out in two cycles. The samples were first carbonized at a temperature of 1000°C according to the following heating mode: 20°C → 450°C, 2°C / min; 450°C → 700°C, 0.1°C / min; 700°C → 1000°C, 1°C / min; hold at 1000°C, 1 h. Subsequent graphitization was carried out according to the following mode: heating RT → 1800°C, 6°C / min; hold at 1800°C, 1 h. The density of the samples after this was 1.73 g / cm³, the interlaminar shear strength — 14.1 MPa, the compressive strength — 139.8 MPa, and the friction coefficient — 0.32–0.34.

This work was carried out in the framework of the state assignment of the Department of Chemistry of the M. V. Lomonosov Moscow State University. Project No AAAA-A21-121011590086-0.

This research was performed according to the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University «The future of the planet and global environmental change».

Получение композиционного материала, армированного частицами

Галкин Е.В., Галкин В.И., Палтиевич А.Р.

МАИ, г. Москва, Россия

В работе рассмотрена возможность использования критериальной системы для определения параметров технологического процесса изготовления композиционных материалов, армированных частицами методом многоциклового прокатки.

В качестве композиционного материала применяется алюминий-медь, где алюминий – матричная составляющая, а медь – армирующий элемент. Заготовка состоит из трех слоев, внешние – матричные и внутренний – армирующий.

В работе применен критериальный подход.

Для процесса многоциклового прокатки сформулированы три критерия:

1. Температурный критерий.

Процессы прокатки и межоперационного отжига должны проходить в условиях горячей пластической деформации для матричного материала и в условиях теплой или холодной деформации для армирующего материала.

2. Критерий формирования прочного соединения компонентов.

На первом проходе прокатки необходимо получить композицию с прочной связью между всеми слоями, при этом внутренний слой меди еще должен сохранить свою сплошность.

3. Критерий сохранения сплошности матричного компонента и разрушения армирующего компонента.

В ходе циклов прокатки требуется обеспечить сохранность сплошности матричного компонента и раздробить упрочняющий.

Для подтверждения результатов, полученных в критериальной системе, проведена прокатка, состоящая из 6 циклов. Проведенный микроструктурный анализ показал, что первоначальная слоистая структура заготовки сохраняла сплошность на протяжении трех циклов прокатки, при этом толщина медной прослойки от цикла к циклу существенно уменьшалась.

Процесс прокатки показал, что раздробление медных слоев начинается после четвертого цикла, по мере возрастания цикла прокатки средняя площадь сечения армирующих частиц снижается почти в 2 раза на каждом последующем.

После шестого цикла прокатки структура полученного материала представляет собой матрицу с равномерно распределенными армирующими частицами меди, при этом средняя площадь этих частиц составила порядка 714 мкм².

Manufacturing of composite materials reinforced by particles

Galkin E.V., Galkin V.I., Paltievich A.R.

MAI, Moscow, Russia

The paper considers the possibility of using the criterion system for determining parameters of the technological process of producing composite materials reinforced with particles by multicycle rolling.

Aluminum-copper is used as composite material, where aluminum is matrix component and copper is reinforcing element. Billet consists of three layers, external layers are matrix ones and internal layer is the reinforcing one.

Criterion approach has been applied in the work.

For the multi-cycle rolling process, the following three criteria have been formulated:

1. Temperature criterion.

The rolling and interoperative annealing processes shall take place under hot plastic deformation conditions for the matrix material and under warm or cold deformation conditions for the reinforcing material.

2. Criterion of strong connection of components.

At the first rolling pass, it is necessary to obtain a composition with a strong bond between all layers, while the inner layer of copper must still maintain its continuity.

3. Criterion for maintaining the continuity of the matrix component and the destruction of the reinforcing component.

During rolling cycles, it is necessary to ensure the continuity of the matrix component and crush the reinforcing component.

To confirm the results obtained in the criterion system, rolling consisting of 6 cycles was carried out. Microstructural analysis showed that the original laminate structure of the workpiece maintained continuity over three rolling cycles, with the thickness of the copper layer being significantly reduced from cycle to cycle.

The rolling process showed that the crushing of the copper layers begins after the fourth cycle, as the rolling cycle increases, the average cross-sectional area of the reinforcing particles decreases by almost 2 times at each subsequent stage.

After the sixth rolling cycle, the structure of the obtained material is a matrix with uniformly distributed reinforcing copper particles, the average area of these particles being on the order of $714 \mu\text{m}^2$.

Разработка технологии листовых полуфабрикатов ТПКМ

¹Гиль А.В., ²Бухаров С.В., ¹Лебедев А.К.

¹НИИГрафит, ²МАИ, г. Москва, Россия

В настоящее время в практике применения ПКМ активно внедряются многослойные конструкции на основе термопластичных связующих. По сравнению с традиционными слоистыми пластиками на основе термореактивных связующих они имеют ряд преимуществ, таких как повышенную трещиностойкость, пониженные влаго- и водопоглощение, а также высокую ремонтпригодность.

Независимо от метода переработки, основной проблемой формования изделий из КМ с термопластичной матрицей является обеспечение качества монолитизации исходного пакета полуфабриката. Из-за высокой вязкости расплавов термопластов ($200 \div 10000 \text{ Па} \cdot \text{с}$), требуется больше времени на пропитку волокнистой структуры. Другой проблемой является термостабильность термопластов при формовании. Остаточная пористость матриц в изделиях из ТПКМ является основной причиной неполной реализации механических свойств армирующей системы на основе высокомолекулярных волокон в материале.

В работе рассматривается получение заготовок методом шагового формования, основанный на получении листовой заготовки путём последовательного зонального воздействия на рабочую область. Такой метод позволяет получить высокое качество заготовки, за счёт равномерного распределения пористости. Такой процесс легко оптимизируется по параметрам межволоконной и межнитяжной пропитки и позволяет устранять дефекты, которые обнаруживаются, непосредственно, в процессе формования. Процесс непрерывный и может быть автоматизирован.

Сборка изделия из заготовок, полученных из листовых термопластичных КМ может осуществляться методами ультразвуковой или лазерной сварки.

1. Головкин Г.С. Совмещение волокнистых наполнителей с термопластичными связующими (обзор) // Пластмассы. — №12. — С. 23—26.

2. Армированные пластики: Справочное пособие / Буканов В.А., Головкин Г.С., Машинская Г.М. и др. / Под ред. Головкина Г.С., Семенова В.И. — М.: МАИ, 1997. — 404 е.

3. Волоконная технология переработки ТКМ / Г.С. Головкин, В.А. Гончаренко, В.П. Дмитренко и др.; Под ред. Г.С. Головкина. — М.: МАИ, 1993. — 232 с.

4. Катомин С. В, Жмаева Н.В. Термопласты, армированные органическими волокнами. — М.: НИИТЭХИМ, 1987.

Continuous thermoplastic composite sheet processing technology

¹Ghile A.V., ²Bukharov S.V., ¹Lebedev A.K.

¹NIIGrafit, ²MAI, Moscow, Russia

Today multilayer structures based on thermoplastic binders are being actively introduced in the practice of using PCM. Compared with traditional laminated plastics based on thermosetting binders, they have a number of advantages, such as increased crack resistance, reduced moisture and water absorption, as well as high maintainability.

Regardless of the processing method, the main problem of molding products from CM with a thermoplastic matrix is to ensure the quality of monolithization of the initial package of semi-finished products. Due to the high viscosity of thermoplastics melts ($200 \div 10000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$), it takes longer to impregnate the fibrous structure. Another problem is the thermal stability of thermoplastics during molding. The residual porosity of matrices in TPCM products is the main reason for the incomplete realization of the mechanical properties of the reinforcing system based on high-modulus fibers in the material.

The paper considers the production of blanks by the step molding method, based on the production of a sheet billet by sequential zonal impact on the working area. This method allows you to get a high quality of the workpiece, due to the uniform distribution of porosity. This process is easily optimized according to the parameters of inter-fiber and inter-thread impregnation and allows you to eliminate defects that are detected directly during the molding process. The process is continuous and can be automated.

The assembly of the product from blanks obtained from sheet thermoplastic CM can be carried out by ultrasonic or laser welding methods.

Технология ремонта сотовых конструкций из композиционных материалов методом термокомпрессионного формования

¹Горбачев Н.В., ²Резниченко В.И.

¹МГТУ ГА, ²МАИ, г. Москва, Россия

Рассмотрим задачу о невозмущённом подкреплении кольцом круглого отверстия в панели. Решение задачи проведем в точной постановке с учетом того, что крепление бруса происходит не по нейтральной линии, а на расстоянии H .

В рамках гипотезы Бернулли, перемещения точек нейтральной линии подкрепляющего стержня и контура соприкосновения стержня с пластиной связаны системой уравнений.

Решение этих уравнений в конечном итоге приводит к образованию двух систем уравнений, удовлетворяющих всем граничным условиям. Однако в системе, не учитывающей параметр H ($H=0$), вокруг отверстия сохраняется возмущенное напряженное состояние.

Таким образом, введение параметра H позволяет полностью убрать возмущения в пластине из-за наличия в ней выреза. В полученных выкладках и вычислениях учтено точное значение кривизны бруса, то есть когда нейтральная ось не совпадает с осевой линией бруса.

Далее предлагаются следующие технологические операции при ремонте больших площадных повреждений, в частности, сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов, которые выглядят следующим образом: 1) подготовка поврежденных участков к ремонту выполняется аналогично традиционной технологии

ремонта, однако далее ремонт больших площадных повреждений значительно отличается от традиционного ремонта:

2) после вырезки поврежденного участка в форме окружности, производится изготовление коробчатого подкрепляющего элемента из КМ в форме кольца или овалоида, в зависимости от формы выреза в зоне повреждения, при этом изготовление подкрепления производится термocomпрессионным способом с помощью специальной силиконовой оправки с внутренним жгутом из углеволокна, используемого в качестве нагревателя; 3) торцы сот заполняются клеевой смесью с микросферами; 4) устанавливается сотовая вставка в полость агрегата с учетом направления выкладки сот; 5) изготавливается крышка из материала аналогичного обшивке, при формировании крышки применяется металлическая цулага и термоодеяло для создания давления и температуры при полимеризации связующих горячего отверждения; 6) крепится крышка к обшивке, соединяя обшивку и крышку с нижней окантовкой-подкреплением вытяжными заклепками, вровень с поверхностью детали, или болтами; 7) нанесение ЛКП и проверка качества ремонта.

Литература:

1. Крысин В.Н., Крысин М.В. Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций // М.: Машиностроение – 1989 – С. 240.
2. Технологические рекомендации ТР 1.4.1831-88. Ремонт сотовых клееных конструкций из полимерных композиционных материалов // М.: ИИАТ – 1984 – С. 183.
3. ICAS proceedings. 17th congress of the international council of the aeronautical sciences. 1990.
4. Карпусенко Б.Ф. Ремонт конструкций из КМ // Техника, экономика, информация. Сер. "Техника и технология", Вып.2. – 1985 – С. 28-33.
5. Резниченко В.И., Хомич В.И. Применение композиционных материалов в энергетике, электротехнике, электронике // М.: Российский Дом Знаний – 1992 – С. 238.
6. P. D. Shockey and others, Structural Airframe Application of Advanced Composite Materials, General Dynamics, IIT Research Institute, Texaco Experiment, AFML-TR-69-01, IV, AF 33(615)-5257, October 1969.
7. Dutton, S., and Kelly, D. (Editors), "Composite Materials for Aircraft Structures," Second Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 2004.

The technology of repair of honeycomb structures made of composite materials by the method of thermocompression molding

¹Gorbakon N.V., ²Reznichenko V.I.

¹MSTU CA, ²MAI, Moscow, Russia

Consider the problem of undisturbed reinforcement of a circular hole in a panel with a ring. We will solve the problem in an exact formulation, taking into account the fact that the timber is fixed not along the neutral line, but at a distance N.

According to Bernoulli's hypothesis, the displacements of the dots of the neutral line of the reinforcing bar and the contour of contact of the bar with the plate are related by a system of equations.

The solution of these equations ultimately leads to the formation of two systems of equations that satisfy all boundary conditions. However, in a system that does not take into account the parameter H ($H = 0$), a disturbed stress state remains around the hole.

Thus, the insertion of the parameter H makes it possible to completely remove the disturbances in the plate due to the presence of a notch in it. The calculations considered the exact value of the curvature of the bar, so when the neutral axis does not coincide with the centerline of the bar.

Further, the following technological operations are proposed for the repair of large area damages, in particular, honeycomb structures made of polymer composite materials, which look as follows: 1) preparation of damaged areas for repair is carried out similarly to the traditional repair technology, however, further repair of large area damage significantly differs from traditional repair:

2) after cutting out the damaged area in the shape of a circle, a box-shaped reinforcing element is made of CM in the form of a ring or an ovaloid, depending on the shape of the cutout in the damaged area, while the reinforcement is made using a thermocompression method using a special silicone mandrel with an inner harness made of carbon fiber, used as a heater; 3) the ends of the honeycomb are filled with an adhesive mixture with microspheres; 4) a honeycomb insert is installed in the cavity

of the unit, taking into account the direction of the honeycomb layout; 5) the lid is made of a material similar to the casing; when molding the lid, a metal mold and a thermo blanket are used to create pressure and temperature during the polymerization of hot-curing binders; 6) the cover is attached to the casing, connecting the casing and the cover with the lower edging-reinforcement with blind rivets, flush with the surface of the part, or with bolts; 7) applying paintwork and checking the quality of the repair.

References:

1. Krysin V.N., Krysin M.V. Technological processes of forming, winding and gluing structures // M.: Mashinostroenie - 1989 - P. 240.
2. Technological recommendations TR 1.4.1831-88. Repair of honeycomb glued structures made of polymer composite materials // M.: NIAT - 1984 - P. 183.
3. ICAS proceedings. 17th congress of the international council of the aeronautical sciences. 1990.
4. Karpusenko B.F. Repair of structures from CM // Technics, Economics, Information. Ser. "Technique and technology", Issue 2. - 1985 - S. 28-33.
5. Reznichenko V.I., Khomich V.I. The use of composite materials in power engineering, electrical engineering, electronics // M.: Russian House of Knowledge - 1992 - P. 238.
6. P. D. Shockey and others, Structural Airframe Application of Advanced Composite Materials, General Dynamics, IIT Research Institute, Texaco Experiment, AFML-TR-69-01, IV, AF 33(615)-5257, October 1969.
7. Dutton, S., and Kelly, D. (Editors), "Composite Materials for Aircraft Structures," Second Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 2004.

Фотополимеризуемые композиции для получения полиэлектrolитных мембран аддитивными технологиями

¹Иванченко А.В., ¹Нечаусов С.С., ²Морозов О.С.

¹МГУ, ²ИНУМиТ, г. Москва, Россия

Ионные актуаторы – это композитные электромеханические преобразователи, состоящие из полиэлектrolитной мембраны, покрытой с обеих сторон электродами. При приложении напряжения между электродами происходит миграция ионов электrolита и одна из его поверхностей набухает эффективнее из-за большего радиуса и более быстрой диффузии ионов одного типа; такая разница в деформации приводит к изгибу всего устройства.

Традиционные методы изготовления актуаторов (горячее прессование, литье из раствора, лазерная резка и т.д.) имеют такие недостатки, как возможное расслоение устройств, низкая воспроизводимость производства, ограничение в толщине и форме актуаторов и т.д. Использование стереолитографии позволит разработать точную и воспроизводимую технологию изготовления ионных актуаторов сложной формы.

Целью данной работы является создание фотоотверждаемой композиции для стереолитографии актуаторов на основе ионных электроактивных полимеров. Для выбора состава композиции было проведено исследование смешиваемости ионных жидкостей (ИЖ) с типичными фотополимеризующимися мономерами и сшивающими агентами. Было обнаружено, что разделение фаз не происходит с N-винилпирролидоном (НВП), 4-акриломорфолином, ПЭГ600ДМА и ТЭГДМА. Так как литературе широко описана термическая радикальная сополимеризация НВП с ТЭГДМА, а также есть удачные исследования фотополимеризации, было решено продолжить работу с этими мономерами.

Для оптимизации состава композиции был проведен ряд исследований, включающий:

Исследование зависимости кинетики фотополимеризации от содержания ионной жидкости и соотношения выбранных ранее мономеров методом УФ-ДСК;

Исследование влияния типа ионной жидкости, ее содержания и соотношения мономеров на ионную проводимость полученных мембран методом спектроскопии импеданса;

Исследование влияния термического постотверждения на ионную проводимость мембран.

По данным УФ-ДСК было установлено, что полимеризация протекает в две стадии; степень конверсии композиций увеличивается с ростом содержания ИЖ. Было показано, что с увеличением длины гидрофобного хвоста ИЖ ионная проводимость мембран уменьшается. При этом с ростом содержания ИЖ проводимость мембран увеличивается. Было установлено, что при УФ-отверждении композиций с введенным инициатором радикальной

полимеризации (АИБН) фотополимеризация последнего на длине волны, выбранной для 3D печати (405 нм), не происходит. Термическое постотверждение, в целом, снижает проводимость мембран.

Photocurable compositions for the production of polyelectrolyte membranes by additive technologies

¹Ivanchenko A.V., ¹Nechausov S.S., ²Morozov O.S.

¹MSU, ²INUMiT, Moscow, Russia

Ionic actuators are composite electromechanical transducers consisting of a polyelectrolyte membrane covered with electrodes on both sides. When applying a voltage between the electrodes, ions move due to electric field. Therefore, the actuator bends toward the opposite side where ion moves due to its volumetric change.

Conventional methods of actuators manufacturing (hot pressing, solution casting, laser cutting, etc.) have several disadvantages such as possible device stratification, low production reproducibility, limitation in thickness and shape of actuators, etc. Using stereolithography leads to development an accurate and reproducible manufacturing technology for complex shape ionic actuators.

The purpose of this work is to create a photocurable composition for ionic actuators by stereolithography. To select the composition formula, an ionic liquids (IL) miscibility with typical photocurable monomers and crosslinkers was investigated. Phase separation was found not to occur with N-vinylpyrrolidone (NVP), 4-acrylomorpholine, PEG600DMA and TEGDMA. Since thermal radical copolymerization of NVP with TEGDMA is widely described in the literature, and there are also successful studies of photopolymerization, it was decided to work with these monomers.

To optimize the composition formula, several studies have been conducted, including:

investigation of kinetics dependence of photopolymerization on ILs content and ratio of previously selected monomers by UV-DSC method;

study of the effect of IL type, its content and the ratio of monomers on the ionic conductivity of the obtained membranes by impedance spectroscopy;

investigation of the effect of thermal post-curing on the ion conductivity of membranes.

According to UV-DSC data, polymerization proceeds in two stages; the conversion rate of the compositions increases with the increase of IL content. Increasing of the length of the hydrophobic IL tail decreases the ionic conductivity of the membranes. At the same time, the conductivity of the membranes increases with IL content increasing. The thermal initiator (AIBN) did not undergo photopolymerization at the wavelength used in this study (405 nm) for UV-curing. Thermal post-curing generally decreases membrane conductivity.

Особенности закрепления формообразующей поверхности оснастки из полимерных композиционных материалов на опорном каркасе

Ирошников А.И., Сёмкин В.Н., Васина Л.Н., Безруков Г.Т.

ОНИИП «Технология», г. Обнинск, Россия

Технология изготовления большинства высокоточных и наиболее нагруженных деталей авиационной и космической техники – вакуумное или автоклавное формование, сочетает в себе давление (вакуумметрическое до 0.98 бар и избыточное до 10 бар), а также температуру до 200°C и требует сложной подготовки производства, включающего в себя проектирование и изготовление формообразующей оснастки.

Рабочая поверхность оснастки должна соответствовать математической модели формируемого изделия (если не подразумевается иного) и гарантировать формостабильность при циклических нагрузках формования, а также обладать необходимым набором механических характеристик. Кроме того, важным фактором является разница между коэффициентом термического линейного расширения (КЛТР) материала оснастки и формируемой детали, так как именно состояние оснастки в момент формования изделия определяет конечную его форму.

Для крупногабаритных деталей авиационной и космической отраслей наиболее актуально рассматривать формование деталей на композитных оснастках, получаемых путём пропитки преформы, выложенной на мастер-модели, методом вакуумной инфузии связующего, сочетающих в себе разумную стоимость при высоких эксплуатационных характеристиках.

В рамках работы произведен анализ конструктивных и технологических решений при изготовлении формообразующей оснастки из ПКМ. Описаны различные виды опорных конструкций оснастки, их достоинства и недостатки:

1) классический металлокаркас; 2) каркас из монолитных ребер из углепластика; 3) каркас из трёхслойных панелей; 4) каркас из углепластиковых профилей.

Отдельной задачей является вопрос соединения формообразующей оболочки и опорной структуры, рассмотрены, проанализированы следующие варианты:

- жесткое клеевое соединение;
- упругое клеевое соединение;
- периметровое механическое закрепление;
- механическое закрепление с точечным опиранием.

После анализа и отработки вышеперечисленных конструкций в качестве основного был выбран вариант совместного использования металлокаркаса с каркасом из трёхслойных панелей, приклеиваемого к формообразующей оболочке на неупругий компаунд.

Литература:

1. Suong V. Hoa. PRINCIPLES of the MANUFACTURING OF COMPOSITE MATERIALS. DEStech Publications Inc. 2009. 343 p.

Features of fixing the form-building surface of the polymer composite tools and the framework

Iroshnikov A.I., Syomkin V.N., Vasina L.N., Bezrukov G.T.

ORPE "Technologiya", Obninsk, Russia

Most of high-precision and most loaded details of aviation and space industries are made by method of the vacuum or autoclave molding combining pressure (vacuum to 0.98 bars and excessive to 10 bars), and also temperature to 200 °C. That demands difficult preproduction including design and production of the polymer composite tools.

Form building surface of composite tool has to be equal to mathematical model of the formed detail (if other is not meant) and guarantee dimensional stability during cyclic loadings of moulding, and also it has to possess necessary set of mechanical properties. Besides, important factor is the difference between coefficient of thermal expansion (CTE) of material of the tool and the formed detail, as the condition of the tool at the time of moulding defines its final form.

For large-size details of the aviation and space industries it is the most urgent to consider production of details using tools made of carbon received by impregnation of the preform on master model, for example – method of vacuum resin infusion, combining reasonable cost and high operational characteristics in it.

Within the report, the analysis of design and technology solutions of production of the form-building tools from PCM is made, in particular interaction of form-building surface of the tool and supporting framework is described. Different types of frameworks of the tools, their merits and demerits are shown:

1) classic steel framework; 2) framework made of carbon plates; 3) framework made of carbon core panel; 4) framework made of carbon webs.

Separate task is the question of connection of form-building surface and the framework, the following options are considered, analyzed:

- inelastic glue joint;
- elastic glue joint;
- perimeter mechanical fixing;
- point mechanical fixing;

After the analysis and working off above-mentioned designs, the option of sharing the Steel framework with framework made of carbon core panel fixed to form-building surface by inelastic glue has been chosen as basic.

References:

1. Suong V. Hoa. PRINCIPLES of the MANUFACTURING OF COMPOSITE MATERIALS. DEStech Publications Inc. 2009. 343 p.

Возможности применения инфузионных технологий в производстве изделий авиационного назначения из ПКМ

Конюшок В.В., Насонов Ф.А.

МАИ, г. Москва, Россия

Технология вакуумной инфузии VARTM, являющаяся переходом от сложного и дорогостоящего процесса RTM, заключается в распределении связующего по телу пре-формы с помощью вакуума, где верхняя половина обычной формы заменяется вакуумным мешком для устранения проблем проектирования с большими металлическими формами.

Существуют некоторые ограничения для перерабатываемых материалов посредством данной технологии. Так, связующее, которое будет использовано в технологии VARTM, должно обладать важной реологической характеристикой: вязкость связующего не должна превышать 0,5 Па·с при рабочей температуре переработки, что гарантирует обеспечение приемлемого уровня прочностных и деформационных свойств. Для регулирования реологических свойств связующего применяют модификаторы, которые снижают вязкость композиции. Стоит отметить, что некоторые разбавители помимо снижения вязкости, способны изменять физико-химические и физико-механические свойства отвержденной матрицы связующего. Соответственно, важной задачей при изготовлении связующего для VARTM технологии является использование разбавителей, которые при строгом сохранении описанных выше свойств, смогут уменьшить вязкость вещества. Ярким примером является разработанное в ФГУП «ВИАМ» связующее на основе эпоксидной смолы и аминного отвердителя, а разбавителем стал модификатор на основе ненасыщенной полиэфирной смолы и инициатора радикальной полимеризации. В данном случае благодаря применению систем ВПС предоставляются широкие возможности для получения высокопрочных ПКМ, перерабатываемых методом вакуумной инфузии.

Использование гибкого вакуумного мешка и вакуумного привода в технологии VaRTM делают подачу связующего к армирующему наполнителю принципиально другим в сравнении с RTM методом, где существуют положительное давление впрыска и жесткие требования к формам изделия. Но в технологии вакуумной инфузии существует риск появления сухих пятен и пустот на изделии – явление пористости. Существует несколько приемов, чтобы свести к минимуму наличие пористости на этапе заполнения связующим наполнителя: применение вакуума на этапе формирования смолы; дегазация смолы в жидкой фазе перед инъекцией, позволяя связующему свободно течь по форме; перенос пузырьков воздуха и летучих веществ через вентиляционную сторону формы, управление температурой прессформы в сочетании с регулируемым давлением по закону Дарси. Данная модель способна оптимизировать процесс VaRTM, используемый при более низких температурах формы. Исходя из этого можно сделать вывод, что совместимость давления потока связующего и термическая составляющая значительна, и их необходимо учитывать во время проектировки потока и терморегуляции для процесса VARTM.

Литература:

1. Song X. Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM): Model Development and Verification // PhD thesis. Blacksburg, Virginia. - 2003. - P. 160
2. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. № 2. С. 38–42.
3. Меркулова Ю.И. Связующие для получения полимерных композиционных материалов способом вакуумной инфузии // - М.: ВИАМ.. - 2016 – С.-143
4. Vishwanath R. Kedari, Basil I. Farah and Kuang-Ting Hsiao Effects of vacuum pressure, inlet pressure, and mold temperature on the void content, fiber composites manufactured with VARTM process // Journal of composite materials 45 (26). - 2016. – С. 2727 - 2742

Possibilities of using infusion technologies in the manufacturing of aircraft products from PCM

Koniushok V.V., Nasonov F.A.
MAI, Moscow, Russia

The VARTM vacuum infusion technology, moving away from the complex and costly RTM process, is to vacuum-dispense the binder throughout the preform body, where the top half of the regular mold is replaced by a vacuum bag to eliminate design problems with large metal molds. There are some restrictions on the materials recyclable through this technology. Thus, the binder that will be used in the VARTM technology should have an important rheological characteristic: the viscosity of the binder should not exceed $0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ at the processing operating temperature, which guarantees an acceptable level of strength and deformation properties. To control the rheological properties of the binder, modifiers are used that reduce the viscosity of the composition. It should be noted that some diluents, in addition to reducing the viscosity, are able to change the physicochemical and physicomachanical properties of the cured binder matrix. Accordingly, an important task in the manufacture of a binder for VARTM technology is the use of diluents, which, while strictly maintaining the properties described above, can reduce the viscosity of the substance. A striking example is a binder developed at FSUE "VIAM" based on epoxy resin and amine hardener, and a modifier based on unsaturated polyester resin and a radical polymerization initiator became the diluent. Due to the modification by the type of interpenetrating polymer networks, it was possible to achieve those characteristics that allow it to be used in VARTM technology without loss in other properties. In this case, thanks to the use of VPS systems, ample opportunities are provided for obtaining high-strength PCMs processed by the method of vacuum infusion. This is due to the fact that when developing new binders, it is necessary to combine diametrically opposite characteristics of the polymer matrix: rigidity, strength, plasticity, and heat resistance. The use of the UPU makes it possible not only to obtain new materials, but also to cope with many emerging technical problems and issues. It was previously noted that the use of a flexible vacuum bag and a vacuum drive in the VaRTM technology makes the supply of the binder to the reinforcing filler fundamentally different in comparison with the RTM method, where there is a positive injection pressure and stringent requirements for product shapes. But in vacuum infusion technology there is a risk of dry spots and voids on the product – the phenomenon of porosity. There are several techniques to minimize the presence of porosity at the stage of filling the filler with a binder: applying a vacuum at the stage of forming the resin; degassing the resin in the liquid phase prior to injection, allowing the binder to flow freely over the mold; transfer of air bubbles and volatiles through the ventilation side of the mold, temperature control of the mold in combination with adjustable pressure according to Darcy's law. Also, due to the decrease in capillary pressure at higher temperatures and a lower pressure drop between the inlet and outlet, it is possible to obtain a low porosity of the part and, accordingly, a high fiber volume fraction. This model is able to optimize the VaRTM process used at lower mold temperatures. Based on this, it can be concluded that the compatibility of binder flow pressure and thermal component is significant and must be taken into account during flow design and thermoregulation for the VaRTM process.

Изучение процессов термического окисления фталонитрильных матриц

¹Лобанова М.С., ²Булгаков Б.А., ²Кепман А.В.

¹МГУ, ²ИНУМиТ, г. Москва, Россия

Для применения полимерных композиционных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками одной из важных задач является оценка влияния термического окисления на свойства материала при повышенных температурах и определение механизмов данного процесса. При этом следует учитывать, что материал матрицы более подвержен термическому окислению чем армирующий наполнитель.

Целью данной работы является изучение процессов термического окисления фталонитрильных матриц, использующихся для изготовления углепластиков.

Характеристики термического окисления полимерных фталонитрильных матриц, постотверждённых при температурах 330-375°C, изучали в динамических и статических условиях. Для определения кинетических параметров термоокисления в динамических условиях применяли метод термогравиметрии с разными скоростями нагрева (2, 5, 10 и 20 °C).

Для определения параметров термоокисления в статических условиях образцы выдерживали при трех температурах в диапазоне 280-350°C и регистрировали изменение таких показателей как масса образцов, температура стеклования и прочность при изгибе.

На основании полученных экспериментальных данных были определены наиболее вероятные кинетические модели процессов термического окисления фталонитрильных матриц и рассчитаны их кинетические параметры (энергия активации и значение предэкспоненциального множителя). Построены зависимости изменения массы, прочности и температуры стеклования от времени выдержки при повышенной температуре. Установлено, что температура стеклования фталонитрильных матриц при высокотемпературной выдержке возрастает, а прочность при изгибе уменьшается в ≈ 2 раза при уменьшении массы на 1,5-2%.

Работа выполнена в рамках государственного задания Химического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (соглашение № АААА-А21-121011590086-0).

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета "Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды".

Study of the processes of phthalonitrile matrices thermal oxidation

¹Lobanova M.S., ²Bulgakov B.A., ²Kepman A.V.

¹MSU, ²INCMaT, Moscow, Russia

One of the problems of high-performance materials application is to assess the thermal oxidation impact on material properties at elevated temperatures and to determine the mechanisms of the process. Furthermore, it should be noted that matrix is more subjected to thermal oxidation than reinforcement.

The aim of this work is to study the thermal oxidation processes of the phthalonitrile matrices used for carbon fiber reinforced plastics manufacturing.

The thermal oxidation characteristics of the phthalonitrile matrices post-cured at temperatures 330-375°C were studied under dynamic and static conditions. Thermogravimetric method with different heating rates (2, 5, 10, and 20°C) was used to determine the thermal oxidation kinetic parameters under dynamic conditions. To determine the thermal oxidation parameters under static conditions, the samples were exposed at three different temperatures in the range of 280-350°C and the changes of parameters (sample mass, glass transition temperature, flexural strength) were detected.

According to the experimental data obtained the most probable kinetic models of the phthalonitrile matrices thermal oxidation processes were determined and the corresponding kinetic parameters (the activation energy and the pre-exponential factor) were calculated.

Mass loss, strength and glass transition temperature versus exposure time at elevated temperature were plotted. It was found that the glass transition temperature increases during elevated-temperature exposure, and the flexural strength decreases by a factor of 2 at the mass loss 1.5-2%.

This work was carried out in the framework of the state assignment of the Department of Chemistry of the M. V. Lomonosov Moscow State University. Project No АААА-А21-121011590086-0.

This research was performed according to the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University «The future of the planet and global environmental change».

Аддитивное производство оптимизированных композитных структур переменной жёсткости, армированных криволинейными и непрерывными волокнами

Малахов А.В.

ИМАШ РАН, г. Москва, Россия

Благодаря высоким характеристикам полимерные композитные материалы, армированные непрерывными волокнами, получили широкое распространение в различных отраслях промышленности. Однако, их успешное применение реализуется только при условии, когда касательные и поперечные напряжения в композитной структуре минимальны, а основная нагрузка передается вдоль волокон. В этой связи возникает потребность в разработке новых методов проектирования и производства композитных материалов, в которых нагрузка, главным образом, передается в направлении волокон.

Для решения поставленных задач был разработан метод моделирования композитных структур, где траектории волокон укладываются в направлении максимального главного напряжения. При наличии концентрации напряжений такие траектории являются криволинейными и на их основе формируются неоднородные свойства материала, зависящие от расположения полученных траекторий волокон. Поскольку траектории волокон непрерывны, то становится возможным использование аддитивного производства для изготовления композитных структур, в которых криволинейные волокна наилучшим образом адаптированы к неоднородному полю напряжений.

Аддитивное производство позволяет изготавливать композитные структуры переменной жёсткости с криволинейным армированием, что достигается за счёт контроля позиционирования сопла, поскольку ориентация волокон выравнивается вдоль направления движения сопла 3D принтера. Такой принцип 3D печати был использован при изготовлении композитных пластин с различными концентраторами напряжений, а полученные результаты испытаний показали [1,2], что переход от однонаправленного армирования к криволинейному приводит к существенному улучшению эффективности композитных структур. Таким образом, адаптируя структуру материала к действующим полям напряжений, становится возможным создавать ещё более перспективные композитные конструкции.

Литература:

1. Sugiyama, K., Matsuzaki, R., Malakhov, A.V., Polilov, A.N., Ueda, M., Todoroki, A.A., Hirano, Y. 3D printing of optimized composites with variable fiber volume fraction and stiffness using continuous fiber / *Composites Science and Technology* 186 (2020) 107905.
2. Hou, Z., Tian, X., Zhang, J., Zheng Z., Zhe, L., Li, D., Malakhov, A.V., Polilov A.N. Optimization design and 3D printing of curvilinear fiber reinforced variable stiffness composites / *Composites Science and Technology* 201 (2021) 108502.

Additive manufacturing of optimized variable stiffness composite structures reinforced curved and continuous fibers

Malakhov A.V.

IMASH RAN, Moscow, Russia

Due to high specific characteristics, polymer composite materials reinforced with continuous fibers are widely used in various industries. However, their successful application is realized only under the condition when the shear and transverse stresses in a composite structure are minimal, and the main load is transferred along the fibers. In this regard, there is a need to develop new methods for the design and manufacture of composite materials, in which the load is mainly transferred in the direction of the fibers.

To solve these problems, a method modeling of composite structures was developed, where the fiber trajectories are aligned in the direction of the maximum principal stress. In the presence of stress concentration, such trajectories are curvilinear and, on their basis, inhomogeneous material properties are formed, depending on the location of the obtained fiber trajectories. Since the fiber trajectories are continuous, it is possible to use additive manufacturing to make composite structures in which curved fibers are best adapted to a non-uniform stress field.

Additive manufacturing allows to manufacture variable stiffness composite structures with curved reinforcement, which is achieved by controlling the positioning of the nozzle, since the fiber orientation is aligned along the direction of movement of the 3D printer nozzle. This principle of 3D printing was used in the manufacture of composite plates with various stress concentrators, and the obtained test results [1,2] showed that the transition from unidirectional reinforcement to curved reinforcement leads to a significant improvement in the efficiency of composite structures. Thus, by adapting the structure of the material to the acting stress fields, it becomes possible to create even more promising composite structures.

References:

1. Sugiyama, K., Matsuzaki, R., Malakhov, A.V., Polilov, A.N., Ueda, M., Todoroki, A.A., Hirano, Y. 3D printing of optimized composites with variable fiber volume fraction and stiffness using continuous fiber / *Composites Science and Technology* 186 (2020) 107905.

2. Hou, Z., Tian, X., Zhang, J., Zheng Z., Zhe, L., Li, D., Malakhov, A.V., Polilov A.N. Optimization design and 3D printing of curvilinear fiber reinforced variable stiffness composites / Composites Science and Technology 201 (2021) 108502.

Перспективная технология микроволнового термоотверждения композитных материалов

Матвеев Е.В., Мамонтов А.В., Гайдар А.И., Лапшинов Б.А., Суворинов А.В.
ФГБНУ «НИИ ПМТ», г. Москва, Россия

Развитие индустрии композитных материалов предъявляет высокие требования к энергоэффективности, направленности и скорости процессов обработки композитов на основе эпоксидного связующего. Можно выделить два основных метода высокотемпературного отверждения – традиционный метод (термические печи) и метод сверхвысокочастотного (СВЧ) нагрева (СВЧ-метод).

При традиционной технологии отверждения эпоксиполимера в термокамере (термический метод) основной нагрев происходит за счёт теплопроводности материала от поверхности в центр материала. При СВЧ-методе отверждения энергия электромагнитного поля одновременно воздействует на весь объём образца, в результате чего происходит более быстрый и равномерный нагрев.

В ходе исследований установлены сравнительные зависимости прочностных, фрактографических и спектроскопических параметров образцов от длительности и интенсивности режимов отверждения термическим и СВЧ методами, а также определены режимы, обеспечивающие максимальную прочность образцов. Образцы, изготовленные различными методами, но имеющие идентичные размеры, цвет по йодометрической шкале и картины изломов, показали близкие значения максимальной прочности и сходные диаграммы деформирования.

При кратковременном высокоинтенсивном отверждении обоими методами наблюдался значительный разброс прочностных параметров образцов. Более стабильные результаты по прочности даёт многоступенчатая обработка с большими временами выдержки. В то же время при использовании СВЧ-метода минимально допустимая (по справочным данным) прочность 53 МПа достигается более чем в два раза быстрее, чем для образцов, отверждённых термическим методом, что позволяет значительно снизить временные затраты и повысить энергоэффективность производства эпоксиполимерных материалов.

Методами растровой электронной микроскопии установлено, что для образцов с близкими прочностными характеристиками, но отверждённых разными методами, СВЧ-метод приводит к увеличению размеров глобул и большему проявлению локальной пластической деформации в процессе разрушения. Разрушение образцов чаще происходит по объёму эпоксидного связующего, а не в области контакта связующего с волокном.

Исследования проведены в ФГБНУ «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий» в рамках государственного задания 2020 года по проекту FNER-2020-0002.

Литература:

1. Ли Х., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. М.: Энергия, 1973. 416 с.
2. Tanrattanakul V., Sae Tiaw K., Journal of Applied Polymer Science, 2005, vol. 97, no. 4, pp. 1442–1461. <https://doi.org/10.1002/app.215786>.
3. Малышева Г.В., Гузева Т.А., Гращенко Д.В., Раскутин А.Е. Влияние технологии нагрева на продолжительность процесса отверждения полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы. Труды ВИАМ. 2018. № 8(68). С. 23–27.
4. Пат. № 2189997 РФ / А. Е. Ушаков, Д. К. Поляков, Т. Г. Сорина и др. // Изобретения. Полезные модели. 2002. № 27.
5. Деев И.С., Кобец Л.П. Фрактография эпоксидных полимеров // Высокомолекулярные соединения. 1996. Сер. А. Т. 38. № 4. С. 627–633.

Advanced technology of microwave thermal curing of composite materials

Matveev E.V., Mamontov A.V., Gaidar A.I., Lapshinov B.A., Suvorinov A.V.

RIAMT, Moscow, Russia

The development of the composite materials industry places high demands on energy efficiency, orientation and speed of processing of composites based on epoxy resin. There are two main methods of high-temperature curing – the traditional method (thermal furnaces) and the method of ultrahigh frequency (microwave) heating (microwave method).

With the traditional technology of curing an epoxypolymer in a thermal chamber (thermal method), the main heating occurs due to the thermal conductivity of the material from the surface to the center of the sample. With the microwave curing method, the energy of the electromagnetic field simultaneously affects the entire volume of the sample, resulting in faster and more uniform heating.

The comparative dependences of the strength, fractographic and spectroscopic parameters of the samples on the duration and intensity of the curing modes by thermal and microwave methods have been established, and the modes providing maximum strength of the samples have been determined. Samples made by different methods, but having identical dimensions, color according to the iodometric scale and fracture patterns, showed similar values of maximum strength and similar deformation diagrams.

With short-term high-intensity curing by both methods, a significant variation in the strength parameters of the samples was observed. More stable strength results are obtained by multi-stage processing with long exposure times. At the same time, when using the microwave method, the minimum allowable (according to reference data) strength of 53 MPa is achieved more than twice as fast as for samples cured by the thermal method, which significantly reduces time costs and increases the energy efficiency of the production of epoxy polymer materials.

Scanning electron microscopy has established that for samples with similar strength characteristics, but cured by different methods, the microwave method leads to an increase in the size of globules and a greater manifestation of local plastic deformation in the process of destruction. The destruction of samples occurs more often in the volume of the epoxy binder, and not in the area of contact of the binder with the fiber.

The research was carried out at the Research Institute of Advanced Materials and Technologies in the framework of the 2020 state assignment for the FNER-2020-0002 project.

References:

1. H. Lee and K. Nevill, Handbook of Epoxy Resins, McGraw-Hill, New York, 1982.
2. Tanrattanakul V., Sae Tiaw K., Journal of Applied Polymer Science, 2005, vol. 97, no. 4, pp. 1442–1461. <https://doi.org/10.1002/app.215786>.
3. Malysheva G. V., Trudy VIAM, 2018, no. 8(68), pp. 23–27 (in Russian).
4. Ushakov A. E., Polyakov D. K., Sorina T. G. et al., RF Patent no. 2189997, Byull. Izobret., no. 27 (2002) (in Russian).
5. Deev I. S., Kablov E. N., Kobec L. P. et al., Trudy VIAM, 2014, no. 7, p. 1 (in Russian).

Особенности технологии изготовления крупногабаритных силовых оболочек

трехслойной конструкции

Петров В.О., Смирнов А.А.

ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия

Использование самонесущих оболочек из полимерных композиционных материалов (ПКМ), созданных на базе трехслойных конструкций, состоящих из углепластиковых обшивок и сотового заполнителя из алюминиевой фольги, получило широкое распространение в агрегатах космической техники. Эти решения внедрены и успешно применяются в головных обтекателях космических аппаратов семейства «Протон-М», «Ангара», «Рокот».

Трехслойные конструкции из ПКМ отличаются высокой жесткостью, технологичны в изготовлении и имеют значительный выигрыш в массе (до 50%) по сравнению с металлическими аналогами. Однако для высоконагруженных агрегатов чаще используют трехслойные сотовые конструкции, подкрепленные жестким каркасом, что снижает массовую эффективность из-за необходимости усиления элементов в зоне крепежа.

Следующим шагом в повышении эффективности деталей и агрегатов на базе трехслойных конструкций является интегрирование в них силовых элементов каркаса. В работе рассматривается технология изготовления крупногабаритной силовой оболочки замкнутого типа с элементами продольного усиления внутренней и наружной обшивок. При этом усиление внутренней обшивки находится между обшивками и не имеет контакта с наружной обшивкой, а усиление наружной обшивки выступает за строительную высоту трехслойной конструкции.

Учитывая толщину усиления (порядка 8 мм), требования по равнотолщинности, обеспечения точности контуров и прочности соединения с обшивкой, а также необходимость в сокращении длительности работ с препрегом, было разработано решение в формировании усиления на отдельной оснастке с использованием контурной рамки, обеспечивающей точность продольного усиления. Все работы по укладке слоев и уплотнению пакетов производились на данной оснастке, после чего неотвержденная заготовка усиления вместе с контурной рамкой, имевшей установочные отверстия для фиксации на оснастке для изготовления оболочки, устанавливалась на внутреннюю обшивку и отверждалась.

Контурная рамка обеспечивала не только точность расположения усиления, но и формировала его торцы, чтобы впоследствии обеспечить качественное соединение сотового заполнителя с усилением по торцевым поверхностям.

В результате разработана технология получения трехслойной конструкции оболочечного типа с подкреплением толстостенными монолитными усиливающими элементами с заданной границей контуров и высокой точностью расположения в конструкции оболочки. Это позволило исключить операцию механической обработки усиливающих элементов, выполнять изготовление усиления параллельно обшивке и сократить цикл изготовления силовой оболочки не менее чем на 15%.

Particular features of the manufacturing process for large-sized load-bearing shells of sandwich structures

Petrov V.O., Smirnov A.A.

ORPE Technologiya, Obninsk, Russia

Self-supporting shells from polymeric composite materials (PCM) based on sandwich structures consisting of CFRP skins and aluminum foil honeycomb core are widely used in space equipment units. These solutions are implemented and successfully applied in nose cones of the Proton-M, Angara and Rokot spacecraft.

The PCM sandwich structures are characterized by high rigidity, adaptability to manufacture, and significant saving in weight (up to 50%) as compared to metallic analogues. However, for high-load units, honeycomb sandwich structures stiffened with a rigid frame are more commonly used, which reduces mass efficiency due to the necessity of reinforcing the elements in the fixing area.

The next step in increasing the efficiency of parts and units based on sandwich structures is integration of the load-bearing frame elements into them. The paper discusses the manufacturing process for a large-sized closed load-bearing shell with elements of longitudinal reinforcement of inner and outer skin. In this case, the reinforcement of the inner skin is placed between the skins, and does not contact the outer skin, whereas the reinforcement of the outer skin is projected beyond the structural depth of the sandwich structure.

Taking into account the thickness of the reinforcements (approximately 8 mm), requirements for thickness uniformity, providing the accuracy of outlines and strength of connection to the skin, as well as the necessity of reducing the prepreg processing time, the solution of forming the reinforcement on the separate tooling with an outline frame providing the accuracy of longitudinal reinforcement was developed. All the lay-up and compaction operations were performed on this tooling, after which the uncured reinforcement blank with the outline frame having mounting holes to fix on the shell manufacturing tooling, was mounted on the inner skin and cured.

The outline frame provided not only the accuracy of the location of the reinforcement but also formed its end surfaces in order to ensure that the honeycomb core is properly connected to the reinforcement at the end surfaces.

This resulted in the development of the process for obtaining the shell-type sandwich structure stiffened with the thick-walled solid elements with the specified outlines and high accuracy of

location in the shell structure. This made it possible to avoid the machining of the reinforcing elements, manufacture the reinforcements in parallel with the skin, and reduce the manufacturing cycle for the load-bearing shell at least by 15%.

Графен КМ технологии для повышения эффективности в проектировании гибридных солнечно электрических криопланов и дирижаблей

Поняев Л.П., Куприков М.Ю.

МАИ, г. Москва, Россия

Развитие российской программы по созданию «транспортных широтных и меридиональных коридоров для развития связанности обширных территорий» Сибири, Дальнего Востока и с выходом на международный Северный морской путь (СМП) и Арктические Трансполярные Авиалинии непосредственно ориентируется и зависит от внедрения и использования инновационных проектных технологий и бортовых систем, новых экологически чистых видов топлив и мощных электро энергетических систем, эффективных материалов-сплавов и композитов, интегральных цифровых и робототехнических систем с искусственным интеллектом.

Новые авиационные программы и проектные технологии связаны с поиском эффективных аэродинамических компоновок самолетов и дирижаблей, позволяющих компактно разместить более объемные топливные емкости с теплозащитой для использования сжиженного водорода LH2 [1,2] , как топлива, и одновременно интегрировать его же в более легкие термоохладительные крио-системы для нагреваемыхся электроэнергетических компонентов, включая охлаждение мощных электромоторов силовых установок, электронакопителей-генераторов с рекуперацией, силовых кабелей бортовой электропроводки, электроаккумуляторов и солнечных батарей.

2. Прорывные направления для современного проектирования авиационного гибридного электроавиатранспорта

Основными приоритетными направлениями развития современного проектирования гибридно электрического авиатранспорта становятся, как новые бортовые электросистемы с использованием уникальных свойств графена, обладающего высокой удельной прочностью и легкостью, а также упругостью и эластичностью с высокой электропроводностью и выгодной газонепроницаемостью для гелия и водорода. Существующие на сегодня проблемы и дороговизна его промышленного получения вполне преодолимы в ближайшем будущем, что связано с новыми методами широкого и дешевого его производства, а его близкие вариации с пространственными структурами – графоном и борофеном – позволят получать уникальные новые интегральные композитные конструкции и интегральные многофункциональные компоновки самолетов и дирижаблей с графеновыми Li-Ion батареями и с нанопленками солнечных батарей по поверхности криопланов и электрических летательных аппаратов с учетом особенностей после продажного обслуживания и их эксплуатации в суровых низкотемпературных условиях на региональных и дальнемагистральных географически выгодных трансполярных межконтинентальных авиалиниях в России и за рубежом.

Необходимо учитывать, что региональные гибридные электрические пассажирские самолеты с низким уровнем токсичности и шума будут иметь более высокий коммерческий спрос при обеспечении улучшенных летно-технических и экономических характеристиках при нужном коротком (или вертикальном, как у дрона-авиатакси) взлете и посадке eSTOL. При этом для магистральных гибридных электрических пассажирских самолетов данные требования не ставятся так остро, но выбор интегральных аэродинамических компоновок тип «интегральной схемы BodyCryoPlane», или как крыло с несущим фюзеляжем, легче решаются проблемы с внутренним размещением более объемных топливных емкостей с жидким водородом LH2, а также с большой площадью верхней омываемой поверхностью самолета или диск-дирижабля под покрытие тонкими гибкими графен-нанопленочными солнечными батареями.

Graphene CM technology for design efficiency of the solar hybrid electrical cryoplane and airships

Ponyaev L.P., Kuprikov M.Yu.

MAI, Moscow, Russia

The development of the Russian program to create "transport latitudinal and meridional corridors for the development of connectivity of vast territories" of Siberia, the Far East and with access to the International Polar Route (IPR) for transnational cross Arctic Transpolar Airlines (TPA) is directly oriented and depends on the introduction and use of innovative design technologies and onboard systems, new environmentally friendly fuels and powerful electric power systems, efficient materials-alloys and composites, integrated digital and robotic systems with artificial intelligence.

New aviation programs and design technologies are associated with the search for effective aerodynamic layouts of aircraft and airships, allowing to compactly place larger fuel tanks with thermal protection for the use of liquefied hydrogen LH2 [1,2] as fuel, and at the same time integrate it into lighter thermal cooling cryo-systems for heating electric power components, including cooling of powerful electric motors of power plants, electric storage generators with recovery, power cables of onboard wiring, electric batteries and solar panels.

2. Breakthrough directions for modern design of aviation hybrid electric air transport

The main priority directions of the development of modern design of hybrid electric air transport are becoming, as new on-board electrical systems using the unique properties of graphene, which has high specific strength and lightness, as well as elasticity and elasticity with high electrical conductivity and favorable gas permeability for helium and hydrogen. The problems existing today and the high cost of its industrial production are quite surmountable in the near future, which is due to new methods of its wide and cheap production, and its close variations with spatial structures - graphone and borophene. It will be allow to obtain unique new integrated composite structures and integrated multifunctional layouts of aircraft and airships with graphene Li-ion batteries and with nanofilms of solar batteries on the surface of cryoplanes and electric aircraft, taking into account the features of after-sales service and their operation in harsh low-temperature conditions on regional and long-haul geographically advantageous transpolar intercontinental airlines in Russia and abroad.

It should be taken into account that regional hybrid electric passenger aircraft with a low level of toxicity and noise will have a higher commercial demand while providing improved flight performance and economic characteristics with the necessary short (or vertical, like an air taxi drone) take-off and landing eSTOL. At the same time, for mainline hybrid electric passenger aircraft, these requirements are not so acute, but the choice of integrated aerodynamic layouts such as the "BodyCryoPlane integrated circuit", or as a wing with a supporting fuselage, it is easier to solve problems with the internal placement of more voluminous fuel tanks with liquid hydrogen LH2, as well as with a large area of the upper washed surface of the aircraft or a disk-airship under the coating of thin flexible graphene-nanofilm solar panels.

Рециклинг стеклоармирующих наполнителей из полимерных композитов на основе эпоксивинилэфирного связующего

Проценко А.Е., Петров В.В., Малышева Д.П.

КНАГУ, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

В соответствии с целями современного общества перейти к производствам замкнутого цикла – безотходному. Остро стоит вопрос в рециклинге полимерных композитов (ПКМ), которые отслужили свой срок и отбракованы. Данная задача считается достаточно сложной, так как большая часть конструкционных композиционных материалов изготавливается на основе термореактивных пластмасс.

На сегодняшний день существует несколько основных способов переработки ПКМ: механический, физический и химический. Наиболее перспективным как показала практика является химический. Основные направления в этом направлении ведутся в направлении подбора среды и условий, обеспечивающих деполимеризацию органической матрицы или ее деструкции. В результате получается сырье для химической промышленности и армирующий наполнитель.

В данной работе представлены результаты рециклинга девятислойного ПКМ на примере системы эпоксивинилэфирная матрица / стекловолокно. Данный материал имеет широкое применение в конструкционных изделиях различного назначения.

Процесс сольволиза проводился при нормальном давлении в реакционном сосуде с обратным холодильником при постоянном перемешивании. В качестве сольвента использовался метилдиэтаноламин. В данной работе выполнен эксперимент по сольволизу в чистом аминспирте и в присутствии катализатора. В качестве катализатора использовался NaOH (5 масс. ч.).

По данным экспериментального исследования в среде аминспирта при температуре 180°C в течении 90 минут происходит незначительное набухание образца, которое составило 3,8 %. Деламинации не наблюдается. При проведении сольволиза в присутствии катализатора через 3 часа отслаиваются внешние слои, через 6 часов образец полностью расслоился. После промывки ткань чистая, белая, без видимых включений матрицы.

Прочность волокон в результате рециклинга снижается на 8 %. При этом использование термических методов рециклинга позволяет получать волокна с прочностью, не превышающей 80 % от исходной.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00246.

Recycling of fiberglass fillers from polymer composites based on epoxy vinyl ester binder

Protsenko A.E., Petrov V.V., Malysheva D.P.

KnASTU, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Closed-cycle production without wastes is the main aim in accordance with the goals of modern society. There is an acute issue in the recycling of polymer composites (PCM), which have served their life and are rejected. This task is considered quite difficult since most of the structural composite materials are made of thermosetting plastics.

Today, there are several main ways of processing PCM: mechanical, physical and chemical. The most promising, as practice has shown, is chemical. The main directions in this direction are in the direction of the selection of the environment and conditions that ensure the depolymerization of the organic matrix or its destruction. The result is a raw material for the chemical industry and a reinforcing filler.

This paper presents the results of recycling a nine-layer PCM using the epoxy vinyl ester matrix / fiberglass system as an example. This material is widely used in structural products for various purposes.

The solvolysis process was carried out at normal pressure in a reaction vessel with a reflux condenser with constant stirring. Methyl diethanolamine was used as a solvent. In this work performed an experiment on solvolysis in pure amino alcohol and in the presence of a catalyst. NaOH (5 mass parts) was used as a catalyst.

According to the data of an experimental study, in an amino alcohol at a temperature of 180 °C for 90 minutes, a slight swelling of the sample occurs, which amounted to 3.8%. Delamination is not observed. When solvolysis is carried out in the presence of a catalyst, the outer layers exfoliate after 3 hours; after 6 hours, the sample is completely exfoliated. After washing, the fabric is clean, white, without visible matrix inclusions.

As a result of recycling, the strength of the fibers is reduced by 8%. At the same time, the use of thermal recycling methods makes it possible to obtain fibers with a strength not exceeding 80% of the original.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 21-79-00246.

Исследование влияния технологических параметров прессования на свойства листовых заготовок из органокомпозита с термопластичной матрицей, пригодных для штамповки элементов конструкций сложной формы ЛА

Салиенко Н.В., Червяков А.А.

МАИ, г. Москва, Россия

Одним из преимуществ применения полимерных композиционных материалов с термопластичной матрицей (ТКМ) при изготовлении из них элементов конструкций, в том числе летательных аппаратов (ЛА), по сравнению с традиционными термореактивными ПКМ,

является применение высокопроизводительных методов формования изделий. Одним из таких наиболее производительных и экономических методов является штамповка листовых термопластов в объёмные изделия сложной формы.

Процесс штамповки изделий из листовых ТКМ, армированных непрерывными волокнами, существенно отличается от процесса штамповки изделий из листовых ненаполненных термопластов. Заданную степень вытяжки заготовок и необходимую реализацию механических свойств в изделиях сложной формы можно обеспечить, либо применением армирующих нитей высокой деформативности, либо выпрямлением и натяжением предварительно извитых заранее в полуфабрикате армирующих нитей. Штампуют изделия из монолитных прессованных заготовок при температуре выше температуры плавления термопластичного связующего, из заготовок уже прошедших три необходимые стадии изготовления любого композита: 1) совмещение связующего с армирующим наполнителем, 2) формирование(сборки) пакета и 3) прессование пакета в листовую заготовку).

Высокая пористость прессованной заготовки напрямую будет влиять на свойства конечного штампованного изделия. Для изготовления монолитных прессованных заготовок наиболее эффективно использовать полуфабрикаты, полученные по волоконной технологии на основе тканей или матов, состоящих из плавких матричных и неплавких армирующих волокон. При последующем переводе матричного термопласта в состояние расплава в процессе прессования заготовки протяженность течения расплава минимальная, что позволяет получать заготовки с высоким качеством пропитки, минимальной пористостью.

Исследованы зависимости пористости листового органокомпозита на основе тканого полуфабриката ТОПАТ (ткани ориентированные полиамидные, армированные волокнами терлон, с содержанием 51%) от температуры и давления прессования. Пакеты собирались из 21 слоя полуфабриката со схемой укладки [0-90]20-0.

Наибольшее снижение пористости листовой заготовки на основе ТОПАТ до минимального значения 2,8% наблюдается при повышении давления до 2 МПа и температуры до 250°C. Зависимости механических свойств прессованных при различных режимах заготовок от пористости показали большую чувствительность к наличию пор: прочность и модуль упругости при растяжении, снижаются на 28% и 17%, соответственно.

Research of technological parameters influence on the properties of blanks made from organocomposite with a thermoplastic matrix, suitable for stamping structural elements of complex shapes for aircraft

Salienko N.V., Chervyakov A.A.

MAI, Moscow, Russia

One of the advantages using polymer composite materials with a thermoplastic matrix (TCM) in the manufacture of structural elements from them including aircraft in comparison with traditional thermosetting PCMs is the use of high-performance methods of molding products. One of these most productive and economical methods are stamping of thermoplastic sheets into parts of complex shape.

The process of stamping parts from sheets TCM reinforced with continuous fibers differs from the process of thermoforming products for sheet blanks unfilled thermoplastics. The predetermined elongation degree of the laminated sheet and the necessary realization of mechanical properties in complex shape parts can be achieved either by using reinforcing threads of high deformability or by straightening and tensioning reinforcing threads previously crimped in a semi-finished product.

Parts are stamping from monolithic pressed laminated sheet at a temperature above the melting temperature of the thermoplastic binder that have already passed the three necessary stages of manufacturing any composite: 1) combining the binder with a reinforcing filler, 2) forming a package (lay-up build), and 3) compression molding the package into a laminated sheet).

The high porosity of the pressed laminated sheet will directly influence on the properties of the final stamped parts. For the manufacture of monolithic pressed laminated sheets, it is most effective to use semi-finished products obtained by fiber technology based on fabrics or mats, consisting of fusible matrix and non-fusible reinforcing fibers. During the subsequent transfer of the matrix thermoplastic to the state of the melt in the process of pressing the billet, the length of the melt flow is minimal,

which makes it possible to obtain laminated sheet with a high quality of impregnation and minimal porosity.

The dependences of the porosity for a sheet polymer-fiber-reinforced plastic based on a woven semi-finished product TOPAT (oriented polyamide fabrics reinforced with Terlon fibers, with a content of 51%) on the temperature and pressing pressure have been investigated. Lay-up was completed from 21 layers of semi-finished product with a reinforcement scheme [0-90]20-0.

The significant decrease in the porosity of laminated sheet based on TOPAT to a minimum value of 2.8% is observed with an increase of pressure up to 2 MPa and temperature up to 250°C. The dependences of the mechanical properties for the blanks pressed at different modes on porosity showed a significant sensitivity to the presence of pores: the strength and modulus of elasticity in tension decrease by 28% and 17%, respectively.

К вопросу об актуальности создания и совершенствования методик проектирования композитных конструкций аэрокосмического назначения, изготавливаемых с применением аддитивных технологий

¹Трубников П.М., ²Насонов Ф.А.

¹ПАО «Ил», ²МАИ, г. Москва, Россия

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет создавать высокоэффективные конструкции аэрокосмического назначения. Очередным витком развития термопластичных материалов и суперконструкционных термопластов и композитов на их основе [1-3], возникает потребность в создании методик проектирования конструкций аэрокосмического назначения из указанных материалов.

По сравнению с термореактивными материалами, материалы на основе термопластичных матриц имеют ряд преимуществ, например, повышенные свойства ударостойкости, возможность применения в качестве сборочных операций сварочных методов взамен точечных крепежных элементов, возможность проведения ремонта более технологичными методами и пр.

В основе аддитивного производства [4] лежит принцип создания готового изделия из термопластичной матрицы путем добавления термопласта в его жидкой фазе и последующего охлаждения на поверхности изделия. Данный метод позволяет получать готовое изделия при использовании минимального количества оснастки. По аналогии с термореактивными композиционными материалами мы можем предположить, что качества термопластичной матрицы с добавленным наполнителем в виде углеродного волокна выгодно отличаются от качеств однофазного термопласта. Однако особенности конструкции наносщего термопласт устройства не позволяют воспользоваться таким удобным типом наполнителя, как ткань, но позволяют использовать наполнитель в виде нити или микросферы. При этом подача нити осуществляется вместе с матрицей в виде дорожки, что позволяет управлять направлением волокон в матрице, что в свою очередь дает возможность задавать прочностные свойства материала по линиям действия нагрузок. По причине того, что используется именно термопласт, готовая конструкция обладает высокой ремонтопригодностью в полевых условиях. Актуальной является задача выработки адекватной методики проектирования композитных изделий аэрокосмического назначения в увязке с возможностями современного и перспективного оборудования и учетом свойств конструкционных материалов.

Литература:

1. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н. Термопластичные связующие для полимерных композиционных материалов// Труды ВИАМ. 2015. № 11. С. 5.
2. Gibson I D. W. Rosen I B. Stucker Additive Manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing 2010
3. W. Zhuang*, Q. Liu, R. Djugum and K. Sharp Aerospace Division, DST Group Additive Manufacturing for Aircraft Component Repair 2016
4. Антонов Ф.А. Аддитивные технологии для композитных материалов. Аддитивные технологии 2019, № 3, С. 18-23

On the relevance of the creation and improvement of design techniques for aerospace composite structures manufactured using additive technologies

¹Trubnikov P.M., ²Nasonov F.A.

¹JSC "Ilyushin Aviation Complex", ²MAI, Moscow, Russia

The use of polymer composite materials (PCM) makes it possible to create highly efficient aerospace structures. With the next round of development of thermoplastic materials and superconstructive thermoplastics and composites based on them [1-3], there is a need to create methods for designing aerospace structures from these materials.

Compared with thermosetting materials, materials based on thermoplastic matrices have a number of advantages, for example, increased impact resistance properties, the possibility of using welding methods as assembly operations instead of point fasteners, the possibility of repair by more technological methods, etc.

Additive manufacturing is based [4] on the principle of creating a finished product from a thermoplastic matrix by adding thermoplastics in its liquid phase and then cooling on the surface of the product. This method allows you to get a finished product using a minimum amount of tooling. By analogy with thermosetting composite materials, we can assume that the qualities of a thermoplastic matrix with an added filler in the form of carbon fiber differ favorably from the qualities of a single-phase thermoplastic. However, the design features of the thermoplastic-applying device do not allow using such a convenient type of filler as fabric, but allow using a filler in the form of a thread or microsphere. In this case, the thread is fed together with the matrix in the form of a track, which allows you to control the direction of the fibers in the matrix, which in turn makes it possible to set the strength properties of the material along the lines of action of loads. Due to the fact that thermoplastics are used, the finished design has high maintainability in the field. An urgent task is to develop an adequate methodology for designing composite aerospace products in conjunction with the capabilities of modern and promising equipment and taking into account the properties of structural materials.

1. Beider E.Ya., Petrova G.N. Termoplastichny'e svyazuyushhie dlya polimerny'x kompozitsionny'x materialov// Trudy VIAM.2015 № 11. P.5

2. Gibson I D. W. Rosen I B. Stucker Additive Manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing 2010.

3. W. Zhuang, Q. Liu, R. Djugum and K. Sharp Aerospace Division, DST Group Additive Manufacturing for Aircraft Component Repair 2016.

4. Antonov F.A. Additivny'e tekhnologii dlya kompozitny'x materialov. Additivny'e tekhnologii 2019, № 3, P. 18-23.

Получение отверстий в материале выполненных из композиционных материалов на основе бороволокна

Трунова Е.А., Шерышев А.Е., Урманцев С.Ш.
МАИ, г. Москва, Россия

В докладе рассматриваются вопросы получения отверстий в композиционных материалах на основе бороволокна. Обсуждаются вопросы – как механической обработки, так и энергетического лучевого воздействия на материал. Проводится анализ применимости механических и энергетических методов, обработки. Отмечаются преимущества и недостатки при технологическом получении сквозных отверстий в композиционных материалах. Приводится график по уносу массы композиционного материала. Приведены фотографии композиционных образцов с факторами лучевого воздействия. Рассматривается дальнейшее применение новых технологий, как с возможностью механического и лучевого применения в композиции этих методов обработки.

Отмечается, что традиционные способы механической обработки обладают быстрым износом режущего инструмента, приводящего к невозможности эффективно использовать этот метод обработки. Особенно этот эффект проявляется на отверстиях диаметром близких к диаметру волокон композиционного материала. При этом энергетические методы обладают сложностью получения ровных краев при создании цилиндрической поверхности, кроме того этот метод приводит к дефектам вызывающим расслоение, обугливание, получение рваных поверхностей как с внешней, так и с внутренней сторон поверхности композиционного

материала. В применение этого метода затруднено в связи из-за увеличения концентрации напряжений и уменьшения прочностных характеристик, как материала, так и всего изделия целиком. Поэтому дальнейшая разработка механического и лучевого или комбинированного методов является актуальным и требует дальнейшей проработки этого вопроса создания цилиндрических отверстий в композиционных материалах.

Obtaining holes in the material made of composite materials based on borofiber

Trunova E.A., Sheryshev A.E., Urmantsev S.Sh.

MAI, Moscow, Russia

The report discusses the issues of obtaining holes in composite materials based on borofiber. The issues of both mechanical processing and energy radiation effects on the material are discussed. The analysis of the applicability of mechanical and energy methods, processing is carried out. Advantages and disadvantages of technological production of through holes in composite materials are noted. A graph is given for the entrainment of the mass of the composite material. Photos of composite samples with radiation exposure factors are given. The further application of new technologies is considered, both with the possibility of mechanical and radiation application in the composition of these processing methods.

It is noted that traditional methods of mechanical processing have rapid wear of the cutting tool, leading to the inability to effectively use this method of processing. This effect is especially evident on holes with a diameter close to the diameter of the fibers of the composite material. At the same time, energy methods have the difficulty of obtaining smooth edges when creating a cylindrical surface, in addition, this method leads to defects causing delamination, charring, obtaining torn surfaces from both the outer and inner sides of the surface of the composite material. The application of this method is difficult due to an increase in stress concentration and a decrease in strength characteristics of both the material and the entire product. Therefore, further development of mechanical and beam or combined methods is relevant and requires further study of this issue of creating cylindrical holes in composite materials.

Полимерный заливочный компаунд для многослойных стеклоконструкций в авиации

Устюжанцева Н.А., Мурох А.Ф., Хамидулова З.С., Ширшин К.В.

АО «НИИ полимеров», г. Дзержинск, Россия

В последние годы в России все больше внимания уделяется проблемам создания полифункционального остекления авиационной техники. Обеспечение полифункциональности остекления возможно при применении многослойных конструкций, в которой каждый из элементов выполняет определенную роль. Целостность и работоспособность многослойного остекления во многом определяется свойствами внутренних склеивающих слоев, формируемых, как автоклавным методом с использованием полимерных пленок, так и с применением отверждаемых заливочных композиций.

В АО «НИИ полимеров» разработан полимерный заливочный компаунд, технологии его приготовления и заливки. В качестве склеивающих материалов применялись полиуретановые эластомеры, обладающие наилучшим, по сравнению с другими полимерами, комплексом деформационно-прочностных свойств. Предлагаемые технологии приготовления и заливки полиуретановых композиций предусматривают минимальный контакт человека с вредными веществами. Все процессы автоматизированы и не требуют вмешательства оператора. Исключается влияние масштабного фактора на жизнеспособность уретановой композиции, процесс может быть непрерывным.

Стеклоконструкции, изготовленные из полимерных стекол, в том числе из полиметилметакрилата, поликарбоната и их комбинаций с силикатным стеклом, и полиуретанового склеивающего слоя, прошли всесторонние испытания и предназначены для изготовления многослойных конструкций в авиации.

1. Каблов, Е.Н., Семенова, Л.В., Богатов, В.А., Мекалина, И.В., Крынин, А.Г., Айзатулина, М.К. Новое электрообогреваемое и птицестойкое полимерное остекление летательных аппаратов. //Пласт. массы. 2017. № 5-6. С.48-52.

2. Pat. US8524839. Curable resin composition, transparent laminate, and process for producing transparent laminate / Kadowaki Yoshinobu, Niiyama Satoshi, Aoki Naoko // Publ. 17.05.2012.

Polymer potting compound for multi-layer glass structures in aviation

Ustyuzhanceva N.A., Murokh A.F., Khamidulova Z.S., Shirshin K.V.

NII Polymerov, Dzerzhinsk, Russia

In recent years in Russia more and more attention has been paid to the problems of creating multifunctional glazing for aviation equipment. Ensuring the polyfunctionality of glazing is possible when using multilayer structures in which each of the elements plays a specific role. The integrity and performance of multilayer glazing is largely determined by the properties of the internal adhesive layers, formed both by the autoclave method using polymer films and using curable potting compositions.

V.A. Kargin Polymer Research Institute has developed a polymer potting compound, technologies for its preparation and pouring. Polyurethane elastomers were used as gluing materials, which have the best in comparison with other polymers, complex of deformation and strength properties. The proposed technologies for the preparation and pouring of polyurethane compositions provide for minimal human contact with harmful substances. All processes are automated and do not require operator intervention. The influence of the scale factor on the viability of the urethane composition is excluded, the process can be continuous.

Glass structures made of polymer glasses, including polymethyl methacrylate, polycarbonate and their combinations with silicate glass, and a polyurethane adhesive layer passed extensive tests and are intended for the manufacture of multilayer structures in aviation.

1. Kablov, E.N., Semenova, L.V., Bogatov, V.A., Mekalina, I.V., Krynin, A.G., Aizatulina, M.K. New electrically heated and bird-resistant polymer glazing for aircraft. / Plast. masses. 2017. No. 5-6. S.48-52.

2. Pat. US8524839. Curable resin composition, transparent laminate, and process for producing transparent laminate / Kadowaki Yoshinobu, Niiyama Satoshi, Aoki Naoko // Publ. 17.05.2012.

Трехмерное армирование полимерных тканевых композитов с помощью фелтинга для управления межслойной трещиностойкостью

Форенталь Г.А., Буслаева О.С., Сапожников С.Б.

ЮУрГУ, г. Челябинск, Россия

Традиционные слоистые полимерные композиты, армированные волокнами, имеют низкую межслойную трещиностойкость, и, как следствие, высокую чувствительность к локальным ударам. Трехмерное армирование позволяет уменьшить чувствительность к расслоению и повысить критическую энергию, необходимую для роста трещины. Авторами предложена специальная технология – фелтинг, которая заключается в пробивке сухого тканевого пакета трехгранной иглой с зубуринами. Такая игла разрывает и вытягивает волокна, создавая трехмерную структуру армирования.

В работе проведены экспериментальные исследования по определению критических энергий развития трещин отрыва GIC и сдвига GIIC по модам I и II (тесты DCB и ENF). Пакет из двух сухих стеклотканей плотностью переплетения пробивали на машине для фелтинга с плотностью $f=10...90$ ударов на 1 см^2 , затем пропитывали компаундом из эпоксидной смолы ETAL370 с отвердителем ETAL45 и с двух сторон приклеивали пластины из стеклотекстолита толщиной 2 мм. Обнаружено существенное влияние фелтинга на величины GIC и GIIC. На примере серии из пяти испытанных образцов с фелтингом $f=10\text{ см}^2$ получено увеличение значения GIC в среднем на 40%, а GIIC – на 30% по сравнению с образцами без фелтинга.

Построены трёхмерные модели образцов с трещинами в тестах DCB и ENF рассмотренного полимерного композита. С помощью МКЭ в рамках нелокальной теории прочности рассчитаны критические напряжения, возникающие в вершине трещин различной длины при разрушении при нагружении по модам I и II. Обнаружено, что нормальные (DCB) и касательные (ENF) критические напряжения можно считать независящими от длины трещины с погрешностью не более 10%. Фелтинг с плотностью ударов $f=10\text{ см}^2$ увеличивает эти напряжения на 20 и 15% соответственно, делая композит более стойким к развитию трещин.

Полученные величины критических напряжений можно использовать далее при оценке расслоений слоистых композитов в условиях низкоскоростного удара.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13007.

Литература:

1. Stack fabric felting to get PCM GIC improvement and LVI tolerance / G.A. Forental, A.V. Kheruvimov, A.V. Nikonov, S.B. Sapozhnikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. №1024 (1). 012001.
2. ASTM. D 7905M Standard test method for determination of the mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites; 2014.
3. ASTM. D 5528-94D Standard test method for Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites; 2014.

3D reinforcement by felting for polymer fabric composites to control interlaminar fracture toughness

Forental G.A., Buslaeva O.S., Sapozhnikov S.B.
SUSU, Chelyabinsk, Russia

Traditional fibre-reinforced laminated polymer composites have low interlaminar crack resistance and, as a result, high sensitivity to local impacts. Three-dimensional reinforcement can reduce the sensitivity to delamination and increase the critical energy required for crack growth. The authors proposed a particular technology – felting, which consists in punching a dry fabric with a triangular barbed needle. The needle pierces the threads of the dry fabric, the barbs cling to the fibres and pull them to the other side of the material, creating a three-dimensional reinforcement structure.

In this work, experimental studies have been carried out to determine the interlaminar critical energy release rates G_{Ic} and G_{IIc} by modes I and II (DCB and ENF tests). The pack of two layers of dry glass fabric with a plain weave structure was punched on a felting machine with the density of $f = 10 \dots 90$ punctures per cm^2 , then impregnated with an ETAL370 epoxy resin compound and ETAL45 hardener, and 2 mm thick GFRP were glued on both sides. A significant effect of felting on the G_{Ic} and G_{IIc} values was found. On the example of a series of five tested specimens with felting $f = 10 \text{ cm}^{-2}$, an increase in the value of G_{Ic} by an average of 40% and G_{IIc} by 30% compared to the specimens without felting was obtained.

Three-dimensional models of specimens with cracks in the DCB and ENF tests of the considered polymer composite are constructed. Using the FEM, within the framework of the nonlocal theory of strength, the critical stresses arising at the tip of cracks of various lengths during fracture under loading according to modes I and II are calculated. It was found that normal (DCB) and shear (ENF) critical stresses can be considered independent of the crack length with an error of no more than 10%. Felting with an impact density $f = 10 \text{ cm}^{-2}$ increases these stresses by 20 and 15%, respectively, making the composite more resistant to cracking.

The obtained values of critical stresses can be used further in evaluating the delamination of laminated composites under conditions of low-velocity impact.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-29-13007.

Определение функций цифровой технологии автоматизированного подбора состава и прогнозирования свойств для полупроводящих полимерных композиционных материалов

Чуков Н.А.

МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

Прямой электрический обогрев самый распространенный способ обогрева промышленных и индустриальных объектов в Арктических условиях. Наибольшей энергоэффективностью обладают саморегулируемые нагревающие кабели основным элементом которых является матрица из полупроводникового полимерного композита. Особенностью таких композитов является способность изменять свою электрическую проводимость в зависимости от температуры. Разработка полимерных композитов для матриц саморегулируемых греющих кабелей связана с рядом взаимосвязанных проблем. Основным требованием для полупроводящих композитов для саморегулируемых греющих кабелей является эффект положительного термического сопротивления, который можно получить только вблизи порога протекания (концентрации перколяции электропроводного наполнителя в диэлектрической полимерной матрице). Порог перколяции достигается, как правило, при высоких степенях наполнения, что создает серьезные проблемы в отношении

перерабатываемости электропроводящих полимерных композитов, их физико-механических свойств и т.д. Существенно упростить проектирование полимерных композиционных материалов для матриц саморегулирующихся кабелей может создание цифровой технологии автоматизированного подбора состава и прогнозирования свойств полупроводящих матриц.

Цифровая технологии для проектирования матриц саморегулируемых греющих кабелей должна выполнять следующие функции:

- Определять необходимое соотношение электропроводящего наполнителя в полимерной матрице. Данный этап является основным и должен показать возможность получения эффекта положительного температурного коэффициента (а значит и эффекта саморегуляции матрицы греющего кабеля) и зависимость электрических свойств композита от температуры.

- Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерного композиционного материала. На этом этапе должен быть получен ответ соответствуют ли прочностные характеристики полимерного композита требованиям, предъявляемым к кабельной продукции.

- Определение технологических характеристик и их количественное определение полимерных композитов, выработка рекомендаций по граничным условиям технологического процесса.

- Прогнозирование влияния технологических факторов переработки полимерного композита в матрицу на эксплуатационные свойства саморегулирующегося греющего кабеля. При этом должно быть уделено внимание постобработке матрицы, такой как радиационное сшивание и термический отжиг.

Создание описываемой цифровой технологии позволит снизить временные и финансовые затраты при разработке обогревающих систем на основе саморегулируемых греющих кабелей. Прогнозирование эксплуатационных и технологических характеристик позволит использовать в качестве сырья местные ресурсы, что особенно важно для Арктического региона. Работа выполнена при поддержке научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования».

Determination of digital technology functions for composition automated selection and prediction of parameters for semiconducting polymer composite materials

Chukov N.A.

Bauman MSTU, Moscow, Russia

Direct electrical heating is the most common method of heating industrial objects in the Arctic. Self-regulating heating cables based on semiconductor polymer composite matrix have the highest energy efficiency. A feature of such composites is the ability to change their electrical conductivity depending on temperature. The development of polymer composites for self-regulating heating cable matrixes is associated with a number of interrelated problems. The main requirement is the effect of positive thermal resistance, which can be obtained only near the percolation threshold (the percolation concentration of the conductive filler in the dielectric polymer matrix). The percolation threshold is usually reached at high degrees of filling, which leads to serious problems regarding to the processability of electrically conductive polymer composites, their physical and mechanical parameters, etc. The creation of a digital technology for the automated composition selection and predicting the parameters of semiconducting matrixes can significantly simplify the design of polymer composite materials for self-regulating cables matrixes.

Digital technology for the design of self-regulating heating cable matrixes should perform the following functions:

- Determine the required ratio of the electrically conductive filler in the polymer matrix. This stage is the main and should show the possibility of obtaining the effect of a positive temperature coefficient (hence the effect of self-regulation of the heating cable matrix) and the dependence of the electrical parameters of the composite on temperature.

- Prediction of the deformation and strength parameters of a polymer composite material. At this stage it becomes clear whether the strength characteristics of the polymer composite meet the requirements for cable products.

- Determination of technological characteristics and their quantitative determination of polymer composites, recommendations output on the boundary conditions of the technological process.

- Predicting the influence of technological factors of processing polymer composite into a matrix on the performance properties of a self-regulating heating cable. Special attention should be paid to matrix post-processing, such as radiation crosslinking and thermal annealing.

Creation of the described digital technology will reduce time and financial costs in the development of heating systems based on self-regulating heating cables. Prediction of operational and technological characteristics will allow using local resources as raw materials, which is important for the Arctic highly.

This work was made with the support by the world-class scientific and educational center «Russian Arctic: new materials, technologies and research methods».

Секция 3. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) для авиастроения, строительства и энергетики, методы исследования и испытаний ПКМ

Section 3. Polymer Composite Materials (PCM) for Aircraft Design, Power Engineering and Construction, Methods of Research and Testing of PCM

Экспериментальное исследование остаточных напряжений в ПКМ с использованием комбинированных методов зондирующих отверстий и корреляции цифровых изображений

Бабайцев А.В., Насонов Ф.А., Соляев Ю.О.
МАИ, г. Москва, Россия

Одной из основных проблем при изготовлении полимерных композиционных материалов (ПКМ), в особенности при не симметричной укладке, представляют собой остаточные напряжения. Они образуются вследствие градиент температурных и силовых воздействий.

Исследовалась возможность и точность применения корреляции цифровых изображений в методе зондирующих отверстий для определения остаточных напряжений в композиционных материалах. Испытания проводилось на образцах ПКМ с несимметричной укладкой, в которых определялись деформации, появившиеся после просверливания отверстия в образце. Фиксация деформаций проводилась по фотоснимкам, с использованием метода корреляции изображений. Для повышения точности фиксации деформации на образцы наносился паттерн. Полученные экспериментальные деформации сравнивались с численным расчетом методом конечных элементов. Решение обратной задачи теории упругости для идентификации остаточных напряжений проводилось в системе Comsol с использованием численного конечно-элементного моделирования, метода Монте-Карло и Нельдера-Мида. Метод Монте-Карло применялся для поиска глобального минимума функции невязок, а метод Нелдера-Мида для уточнения локального минимума. Функция невязок расчетных и экспериментальных данных вычислялась в среднеквадратичном приближении. Для уточнения среднего поля деформаций в эксперименте и игнорирования неустраняемых погрешностей, связанные с неточностью экспериментальных данных, вводились малые значения поправки. В результате исследования было получено хорошие количественные результаты. В ходе испытаний было получена полная картины для всех компонент деформаций, что представляет собой значительное преимущество по сравнению с остальными методами определения остаточных деформаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код проекта FSFF-2020-0017)

Experimental study of residual stresses in PCM using combined probing hole and digital image correlation methods

Babaytsev A.V., Nasonov F.A., Solyaev Y.O.
MAI, Moscow, Russia

One of the main problems in the manufacture of polymer composites (PCM), especially in non-symmetrical layouts, are residual stresses. They are formed due to gradient temperature and force influences.

The feasibility and accuracy of using digital image correlation in the probing hole method to determine residual stresses in composite materials was investigated. Tests were carried out on PCM specimens with asymmetric stacking, in which deformations appeared after drilling a hole in the specimen were determined. Fixation of the deformations was carried out using photographic images, using the method of image correlation. To improve the accuracy of strain fixation, a pattern was applied to the specimens. The obtained experimental strains were compared with numerical calculations using the finite-element method. The inverse problem of elasticity theory for residual

stress identification was solved in the Comsol system using numerical finite-element modeling, Monte Carlo method, and Nelder-Meade method. The Monte Carlo method was used to find the global minimum of the residual stress function, and the Nelder-Meade method to refine the local minimum. The function of deviations of the calculated and experimental data was calculated in the root-mean-square approximation. Small correction values were introduced to refine the mean strain field in the experiment and to ignore the unrecoverable errors associated with the inaccuracy of the experimental data. Good quantitative results were obtained as a result of the study. The tests yielded a complete picture for all strain components, which represents a significant advantage over the rest of the methods for determining residual strain.

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project code FSFF-2020-0017).

Изучение влияния модификации маленимидных связующих фталонитрильными фрагментами на термические и механические свойства отвержденных смол

¹Алексанова А.А., ²Нечаусов С.С., ²Булгаков Б.А.

¹МГУ, ²АО «ИНУМиТ», г. Москва, Россия

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений развития авиационного материаловедения является разработка конструкционных полимерных композиционных материалов (ПКМ), предназначенных для длительной эксплуатации в условиях воздействия высоких температур. Наиболее применимыми являются бисмаленимидные смолы (БМИ), поскольку являются сравнительно более термостойкими, чем эпоксидные связующие, при этом сохраняется уровень технологичности. Поскольку требования по тепло-, термо- и огнестойкости, механическим характеристикам и технологичности неуклонно растут, это подразумевает создание новых видов термоустойчивых полимерных связующих. В данной работе осуществляется замещение одной маленимидной группы на фталонитрильную в смеси бисмаленимидодифенилметан (БМИ) – диаллил бисфенола А (ДАБА) для повышения термостойкости отвержденной смолы.

Для получения такого состава был осуществлен трехстадийный синтез маленимид-фталонитрильных мономеров PNB, причем были получены и сравнены свойства орто-, мета- и пара- изомеров. Методом ДСК были определены их тепловые эффекты, где мета-изомер обладал наименьшей температурой плавления (107°C), что определило его дальнейшее применение.

Для формования ПКМ важной технологической характеристикой связующего является профиль вязкости. Поскольку при невысоких температурах вязкость определяет ДАБА, кривые совпадают. Уширение технологического окна полученной смеси PNB-ДАБА (160°C) связано с появлением фталонитрильных групп, требующих более высоких температур для отверждения, что также отражено на кривых ДСК.

Из экспериментов ДМА и ТГА видно, что тепловые характеристики отвержденной смеси PNB-ДАБА значительно превышают общепринятую систему БМИ-ДАБА. При отверждении 280°C Тст для PNB-ДАБА составляет 358°C, в то время как для БМИ-ДАБА – 290°C. Т5% также значительно отличаются – 456 и 407°C соответственно. Таким образом, полученный состав обладает термо и теплостойкостью с сохранением вязкостных характеристик, что делает такой материал перспективным в качестве смол для ПКМ методами вакуумной инфузии и инъекции в форму.

Study of the effect of modification of maleinimide binders by phthalonitrile fragments on the thermal and mechanical properties of cured resins

¹Aleksanova A.A., ²Nechausov S.S., ²Bulgakov B.A.

¹MSU, ²INCMaT, Moscow, Russia

Currently, one of the most promising areas is the development of structural carbon fiber reinforced materials (CFRM) designed for aircraft materials with long-term operation under high temperature conditions. Bismaleimide resins (BMI) are the most applicable, since they are relatively more heat-resistant than epoxy binders, while maintaining the level of processability. Since the requirements for heat, thermal and fire resistance, mechanical characteristics and manufacturability are steadily increasing, this implies the creation of new types of heat-resistant polymer binders. In this work, one

maleimide group is replaced by a phthalonitrile group in a mixture of bismaleimidodiphenylmethane (BMI) – diallyl bisphenol A (DABA) to increase the heat resistance of the cured resin.

To obtain such composition, a three-stage synthesis of maleimide-phthalonitrile PNB monomers was carried out, and the properties of ortho-, meta- and para-isomers were obtained and compared. Their thermal effects were determined by the DSC method, where the meta-isomer had the lowest melting point (107°C), which determined its further application.

An important technological property of the composite binder is viscosity-temperature profile. Since the viscosity is determined by DABA at low temperatures, the curves coincide. The broadening of the technological window of the resulting PNB-DUB mixture (160°C) is associated with the appearance of phthalonitrile groups requiring higher temperatures for curing, which is also reflected in the DSC curves.

From the experiments of DMA and TGA, it can be seen that the thermal characteristics of the cured PNB-DABA mixture significantly exceed the generally accepted BMI-DABA system. When curing 280°C, the T_g for PNB-DABA is 358°C, while for BMI-DABA it is 290°C. T5% also differ significantly – 456 and 407°C, respectively. Thus, the resulting composition has thermo and heat resistance while maintaining viscosity-temperature characteristics, which makes such a material promising as resins for CFRM by vacuum infusion and injection into the mold.

Исследование взаимодействия элементарных ячеек в метаматериале

Ахметшин Л.Р.

ТГУ, г. Томск, Россия

Метаматериалы – это искусственно созданные материалы, свойства которых зависят не от химического состава, а от структуры. Заданная структура позволяет достигать уникальных свойств, не встречающихся в природе.

Каждое вещество в природе состоит из элементарных ячеек. В обычном материале такие ячейки образуются из строгого расположения атомов, в метаматериалах размеры ячеек много больше атомарного размера. Другими словами, элементарная ячейка метаматериала строится искусственно на мезомасштабе. Структура в этом случае является программируемой и ее элементы могут деформироваться по необходимым механизмам, к примеру, поворачиваться, изгибаться и так далее. Особую актуальность разработке изделий из механических метаматериалов придают успехи в развитии современных технологий 3D печати.

Цель данной работы заключалась в численном исследовании взаимодействия элементарных ячеек тетрахирального метаматериала при одноосном нагружении.

Геометрическая модель элементарной ячейки метаматериала имеет форму куба. Грани куба получены путем соединения тетрахиральных структур в декартовой системе координат. Тетрахиральная структура состоит из кольца и 4 связей (ребер), соединенных с кольцом по касательной и взаимодействующих с другими ячейками.

В работе рассмотрено взаимодействие двух элементарных ячеек. Наиболее важным является место соединения элементарных ячеек. Следует различать методы соединения: (1) присоединение, когда две ячейки в области контакта образуют двойную толщину смежной грани и (2) внахлест, когда две ячейки имеют одну общую сторону.

Математическое моделирование проводилось методом конечных элементов. Решалась квазистатическая задача механики деформируемого твердого тела. Рассмотрено одноосное нагружение системы двух элементарных ячеек метаматериала. Граничные условия прикладывались к двум граням системы: снизу – жесткая заделка и сверху – заданное перемещение.

В результате математического моделирования выяснилось, что расположение ячеек в метаматериале способом «присоединение» может привести к разнонаправленному вращению колец элементарных ячеек метаматериала. Причем разнонаправленность вращения будет происходит в одной плоскости, что отрицательно сказывается на скручивании всей системы ячеек. В случае соединения ячеек «внахлест» не возникает разнонаправленности вращения, поэтому создание образца метаматериала этим методом позволит достичь более высоких значений скручивания образца.

Investigation of unit cells interaction in a metamaterial

Akhmetshin L.R.

TSU, Tomsk, Russia

Metamaterials are artificially created materials, which properties more depend on their macrostructure and less depend on their chemical composition. Creating the structure makes it possible to achieve unique properties, which cannot be found in nature.

Every substance in nature consists of unit cells. In nature materials, the cells are formed from a strict arrangement of atoms; in metamaterials, the size of the cells is much larger than the atomic size. In other words, the unit cell of a metamaterial is constructed artificially on the mesoscale. The structure in this case is programmable and its elements can be deformed according to necessary mechanisms, for example, they can rotate, bend, etc. Advances in the development of modern 3D printing technologies give special relevance to the development of products from mechanical metamaterials.

The goal of this work was to numerically model the interaction of unit cells of a tetrachiral metamaterial under uniaxial loading.

The geometric model of the unit cell of the metamaterial has the shape of a cube. The faces of the cube are obtained by piece together tetrachiral structures in the Cartesian coordinate system. Tetrachiral structure consists of a ring and four ligaments connected to the ring tangentially and interacting with other cells.

In the paper, the interaction of two unit cells is considered. The most important point in this case is the connection of unit cells. A distinction should be made between two methods of connecting: (1) joining, where two cells in the contact area form a double thickness of an adjacent edge, and (2) overlapping, where two cells share a common edge.

Mathematical modeling was performed by means of the finite element method. The quasi-static problem of solid mechanics was solved. The system of two unit cells of the metamaterial was subjected to uniaxial loading. The following boundary conditions were applied at two faces of the system: a bottom was rigidly fixed and a given displacement was applied at the top.

As a result of mathematical modeling, it was found that the arrangement of cells in the metamaterial by "joining" method can lead to multidirectional rotation of the rings of the metamaterial's unit cells. Moreover, the multidirectional rotation will occur in one plane, which will have a negative effect for the whole system of cells. In the "overlapping" method, there is no differently directed rotation, so the creation of a sample of metamaterial by this method will allow achieving higher values of the sample twist.

Разработка и применение обобщенных моделей долговечности для прогнозирования определяющих характеристик композитов

¹Бакулин В.Н., ²Гусев Е.Л., ²Черных В.Д.

¹МАИ, г. Москва; ²СВФУ, г. Якутск, Россия

В работе рассмотрены перспективные модели прогнозирования долговечности полимерных композитов при воздействии экстремальных факторов внешней среды и эксплуатационных нагрузок. Проведено исследование возможностей эффективного прогнозирования определяющих характеристик (остаточного ресурса, прочности, надежности, долговечности) на основе информации, полученной в первые годы эксплуатации. В основу разработки обобщенных моделей долговечности композитов в экстремальных условиях положены основные положения современной молекулярнокинетической теории. Это обусловлено тем, что химические превращения в композитах могут происходить как на межмолекулярных, так и на внутримолекулярных уровнях.

На основе современных положений молекулярно-кинетической теории был исследован вопрос о согласовании определяющих параметров математических моделей, вычисленных в результате решения задач прогнозирования в рамках сформулированных уточненных вариационных постановок, учитывающих результаты экспериментальных измерений на макроуровне, с соответствующими определяющими параметрами физических моделей, описывающих молекулярные взаимодействия на микроуровне.

Был введен ряд основополагающих принципов и понятий, позволяющих провести оптимальное согласование определяющих параметров, вычисленных на основе построенных

математических моделей, на макроуровне с определяющими параметрами физических моделей, описывающими молекулярные взаимодействия на микроуровне. Приведены результаты вычислительных экспериментов.

Development and application of generalized durability models for predicting the defining characteristics of composites

¹Bakulin V.N., ²Gusev E.L., ²Chernykh V.D.

¹MAI, Moscow; ²NEFU, Yakutsk, Russia, Russia

The paper investigates the issue of promising ways to predict the durability of polymer composites under the influence of extreme factors of the external environment and operational loads. The study of the possibilities of effective forecasting of defining characteristics (residual life, strength, reliability, durability) is carried out based on information received in the first years of operation. The development of generalized models of durability of composites under extreme conditions is based on the main provisions of the modern molecular kinetic theory. This is due to the fact that chemical transformations in composites can occur both at intermolecular and intramolecular levels.

On the basis of the modern provisions of molecular kinetic theory, the issue of matching the defining parameters of mathematical models calculated as a result of solving forecasting problems within the framework of formulated refined variational statements taking into account the results of experimental measurements at the macro level with the corresponding defining parameters of physical models describing molecular interactions at the micro level was investigated.

A number of fundamental principles and concepts were introduced that allow for optimal matching of the defining parameters calculated on the basis of the constructed mathematical models at the macro level with the defining parameters of physical models describing molecular interactions at the micro level. The results of computational experiments are presented.

Композиты в градиентной теплотометрии

¹Барabanова О.А., ¹Набатчиков С.В., ²Павлов А.В., ²Сероштанов В.В.

¹МАИ, г. Москва; ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Градиентная теплотометрия является одним из лучших способов определения тепловых потоков: она позволяет фиксировать, обрабатывать и анализировать пульсации их плотности, что даёт уникальные возможности в газодинамике, сложном теплообмене и т.д.

Особо важно, что градиентные датчики теплового потока (ГДТП) обладают постоянной времени в 10-8...10-9 с, что на 3...5 порядков меньше, чем у лучших мировых аналогов.

Перспективы таких исследований в аэрокосмической области велики, но практически не использованы.

ГДТП создаются на основе материалов с анизотропией тепло-, электропроводности и коэффициента термоЭДС. Количество природных анизотропных металлов невелико, и влиять на их свойства, включая термостойкость, невозможно. Поэтому интерес к слоистым композиционным материалам (СКМ) с прочным соединением компонентов очевиден.

Диффузионная сварка обеспечивает гарантированный равномерный плоскостной физический контакт и неглубокий по залеганию от поверхности фронт объемного взаимодействия, минимальное изменение свойств свариваемых материалов, а также приемлемую прочность СКМ и достаточно высокий уровень его термоЭДС.

На основе СКМ сталь 12Х18Н9Т + никель, сталь 65Х13 + никель, хромель + алюминий и железо + константан, изготовленных методом диффузионной сварки, созданы и апробированы ГДТП, работоспособные до температуры 10000 С. Термостойкость датчиков можно повысить при использовании тугоплавких материалов (титана, ниобия и др.). В качестве слоев удалось использовать не только монокристаллы, но и проницаемые материалы: волокнистые, сетчатые, с регулярной перфорацией и т. д.

Особый интерес вызывают композиции полупроводник + проводник, поскольку коэффициенты термоЭДС у полупроводников на порядок и более превышают уровень, характерный для металлов. Наиболее перспективны композиции на основе кремния с p- и r-проводимостью.

В диффузионной сварке монокристаллического кремния с высокотеплопроводными металлами (Al, Cu) сделаны лишь первые шаги. Нелинейность физических свойств СКМ

требует оптимизировать их структуру по экспериментальным данным, сочетая диффузионную сварку заготовок с градуировкой ГДТП на аттестованных стендах.

При удовлетворительных результатах наука и практика получают новый инструмент исследования, не имеющий на сегодняшний день аналогов.

Composites in gradient thermometry

¹Barabanova O.A., ¹Nabatchikov S.V., ²Pavlov A.V., ²Seroshtanov V.V.

¹MAI, Moscow, Russia; ²SPbPU, Saint-Petersburg, Russia

Gradient heat metering is one of the best ways to determine heat fluxes: it allows you to record, process and analyze pulsations of their density, which provides unique opportunities in gas dynamics, complex heat transfer, etc.

It is especially important that gradient heat flux sensors (GHFC) have a time constant of 10-8 ... 10-9 s, which is 3 ... 5 orders of magnitude less than that of the best world analogues.

The prospects for such research in the aerospace field are great, but practically not used.

GHTP are created on the basis of materials with anisotropy of thermal and electrical conductivity and Seebeck coefficient. The amount of natural anisotropic metals is small, and it is impossible to influence their properties, including heat resistance. Therefore, the interest in laminated composites (SCM) with strong bonding of components is obvious.

Diffusion welding provides a guaranteed uniform planar physical contact and a shallow front of volumetric interaction from the surface, a minimum change in the properties of the materials being welded, as well as an acceptable strength of the SCM and a sufficiently high level of its thermoEMF.

On the basis of SCM steel 12X18H9T + nickel, steel 65X13 + nickel, chromel + alumel and iron + constantan, manufactured by diffusion welding, GDTPs have been created and tested, operating up to a temperature of 10,000 C. The temperature resistance of sensors can be increased using refractory materials (titanium, niobium, etc. etc.). As layers, it was possible to use not only monolithic, but also permeable materials: fibrous, mesh, with regular perforation, etc.

Of particular interest are the semiconductor + conductor compositions, since the thermoEMF coefficients of semiconductors are an order of magnitude or higher than the level characteristic of metals. Compositions based on silicon with n- and p-conductivity are the most promising.

Only the first steps have been taken in diffusion welding of monocrystalline silicon with highly heat-conducting metals (Al, Cu). The nonlinearity of the physical properties of SCM requires optimizing their structure according to experimental data, combining diffusion welding of workpieces with the calibration of the GDTP on certified stands.

With satisfactory results, science and practice will receive a new research tool that has no analogues today.

Расчётные и экспериментальные исследования тонких сжатых панелей с учётом вторичной бифуркации при закритическом поведении

¹Боровков Д.К., ¹Турбин Н.В., ²Агафонов И.И.

¹МАИ, г. Москва, Россия;

²Рижский технический университет (РТУ), г. Рига, Латвия

Объектами исследования данной работы являются тонкие прямоугольные обшивки несущих панелей кессона крыла самолета малой авиации, для которых допускается потеря при сжимающих нагрузках ниже эксплуатационного уровня. Особенностью рассматриваемого случая является достаточно большой этап закритического поведения и возможность вторичной бифуркации (увеличения числа полуволн потерявшей устойчивость панели) при геометрически нелинейном поведении тонкой обшивки. Целью работы являлось проведение расчетных и экспериментальных исследований прочности при допустимости закритического поведения тонких панелей из металлических и композитных материалов. В представленной работе методом конечных элементов проведен численный анализ закритического поведения металлических и ортотропных прямоугольных панелей при сжатии с учетом этапов вторичной бифуркации. Решения проведены при использовании особенностей квазистатической и динамической постановки геометрически нелинейной задачи. Также представлено аналитическое решение геометрически нелинейной задачи методом Ритца с учетом возможного увеличения числа полуволн при нагружении.

Представлены некоторые результаты экспериментальных исследований тонких панелей, полученных при сжатии в приспособлении, которое соответствует стандарту ASTM D 7137. В рассматриваемом случае при проведении испытаний тонкие обшивки рассматривались в качестве конструктивно – подобных образцов. Практическая значимость работы заключается в обосновании возможности более широкого применения методологии проектирования тонких панелей по закритическому состоянию [1] с учетом эффектов вторичной бифуркации. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения методик проектирования тонких обшивок несущих панелей по закритическому состоянию при нагружении сжимающими усилиями.

Analytical and experimental investigation of thin panels loaded in compression including secondary path in post-buckling state

¹Borovkov D.K., ¹Turbin N.V., ²Agafonov I.I.

¹MAI, Moscow, Russia;

²Riga Technical University (RTU), Riga, Latvia

The objects of the present investigation are thin rectangular load-bearing panels of the wing-box structure of the light aircrafts, for which entering the buckling state is permitted under the loads before limit level. The characteristic of the considered case is relatively prolonged post-buckling period with possible secondary path (increasing of the half-waves in the structure after buckling load is exceeded) and non-linear performance of the thin skin. The goal of this work is to conduct experimental and analytical studies on the bearing capacity of the thin structural panels made of metallic and composite materials with permitted post-buckling state. The study includes the finite element analysis of post-buckling state of metallic and orthotropic rectangular panels before and beyond the bifurcation point. Solution is obtained using non-linear quasi-static and dynamic formulation. Also, analytical variant of solution based on Ritz method is performed, which considers half-waves number increase as well. Some results of thin panels compression testing under ASTM D 7137 standard are given. In the considered case, thin panels are treated as structural elements. Practical significance of the work may be seen in justification of the wider applicability of the design procedures targeted post-buckling state [1] of thin panels with secondary path. Obtained results might be utilized for refinement of the design methodology for thin panels with allowable post-buckling state.

Разработка композиционных материалов с полимерной матрицей, армированной проволокой из никелида титана

Бурдин Д.В., Виноградов Р.Е., Смирнова Е.А.

МАИ, г. Москва, Россия

Композиционные материалы (КМ) – многосоставные материалы, обычно состоящие из пластичной матричной основы, с распределенными в ней армирующими волокнами или дисперсными частицами; при этом выгодно используют индивидуальные свойства компонентов состава. Сочетание разнообразных веществ приводит к созданию нового материала, чьи свойства заметно отличаются от свойств каждого из его компонентов. Широкий спектр материалов с требуемым набором свойств получают, варьируя состав, количественный состав и ориентацию армирующих элементов и матрицы.

В данной работе проводились механические испытания КМ с полимерной матрицей из полиэтилена низкого и высокого давления, армированные проволоками из сплава ТН1 (55,7% Ni) диаметром 2,48 мм. Испытания проводились по схеме трехточечного изгиба, где образцы подвергались нагружению – разгрузению с увеличением прогиба в каждом следующем цикле.

Была разработана технология создания КМ с матрицей из полиэтилена высокого и низкого давления, армированной проволокой из никелида титана. Предложены способ и этапы технологических операций создания композиционных материалов: Установлены температурно-временные режимы для ПНД – 170 0С, для пвд – 130 0С, сварка полиэтилена проводится под давлением массивным грузом, предварительно расположив под него прослаивающий материал.

Изучено механическое поведение КМ, армированного двумя (объемная доля 2,8%) и тремя (объемная доля 4,1%) проволоками из никелида титана с полиэтиленом высокого и низкого давления.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что при армировании полиэтилена высокого давления проволоками из никелида титана свойства полиэтилена в разы улучшаются, он становится более упругим и способен упруго деформироваться при статических нагрузках.

При армировании полиэтилена низкого давления проволоками из никелида титана, в разы возрастает жесткость изделия, его упругость, деформационная стойкость.

Благодаря повышению жесткости и проявлению небольшой по величине сверхупругой деформации в КМ с матрицей из полиэтилена низкого давления, армированного тремя проволоками из никелида титана, возможно его применение в ортопедии, в частности, в изготовлении динамических туторов для ходьбы. При выполнении работы был изготовлен опытный образец изделия.

Development of composite materials with a polymer matrix reinforced with titanium nickelide wire

Burdin D.V., Vinogradov R.E., Smirnova E.A.
MAI, Moscow, Russia

Composite materials (CM) are multi-composite materials, usually consisting of a plastic matrix base, with reinforcing fibers or dispersed particles distributed in it; at the same time, individual properties of the components of the composition are advantageously used. The combination of various substances leads to the creation of a new material whose properties are markedly different from the properties of each of its components. A wide range of materials with the required set of properties is obtained by varying the composition, quantitative composition and orientation of reinforcing elements and matrices.

In this work, mechanical testing of CM with a polymer matrix of low- and high-pressure polyethylene reinforced with wires made of alloy TN1 (55.7% Ni) with a diameter of 2.48 mm was carried out. The tests were carried out according to the three-point bending scheme, where the samples were subjected to loading and unloading with an increase in deflection in each subsequent cycle.

A technology has been developed to create a CM with a matrix of high and low pressure polyethylene reinforced with titanium nickelide wire. The method and stages of technological operations for the creation of composite materials are proposed: temperature and time regimes are established for HDPE – 170°C, for LDPE – 130°C, polyethylene welding is carried out under pressure with a massive load, having previously placed the interlayer material under it.

The mechanical behavior of CM reinforced with two (volume fraction 2.8%) and three (volume fraction 4.1%) wires made of titanium nickelide with high and low-pressure polyethylene was studied.

Based on the results obtained, it can be concluded that when high-pressure polyethylene is reinforced with titanium nickelide wires, the properties of polyethylene improve significantly, it becomes more elastic and is able to deform elastically under static loads.

When reinforcing low-pressure polyethylene with titanium nickelide wires, the rigidity of the product, its elasticity, and deformation resistance increase significantly.

Due to the increased rigidity and the manifestation of a small superelastic deformation in CM with a matrix of low-pressure polyethylene reinforced with three wires of titanium nickelide, it is possible to use it in orthopedics, in particular, in the manufacture of dynamic walking splints. During the execution of the work, a prototype of the product was made.

**Термопластичные полимерные композиционные материалы, армированные
волокнами из сверхвысокомолекулярного полиэтилена для космических
конструкций**

Бухаров С.В., Ветохин И.С.

МАИ, г. Москва, Россия

В настоящее время в открытом космосе используются элементы орбитальных станций, метеорологические, навигационные, геодезические спутниковые антенны сложной конфигурации, разворачивающиеся космические радиотелескопы больших размеров, энергетические установки, собираемые на орбите пространственные стержневые системы солнечных батарей и электростанций, панели для ретрансляционных станций, платформы для причаливания транспортных космических кораблей и другие конструкции, размеры которых могут достигать нескольких десятков метров. Для отдельных деталей подобных конструкций целесообразно использовать углекомпози́ты на термоактивной матрице, обладающих относительно низкой плотностью и высокими показателями удельных значений физико-механических свойств.

Однако в интервале космических температур ($-150...+150^{\circ}\text{C}$) такие композиционные материалы значительно изменяют механические свойства.

Разработка принципиально новых конструкций космических аппаратов требует создание материалов с низкой плотностью, высокими показателями и стабильностью физико-механических свойств в процессе космической эксплуатации при низких температурах. Для этих целей наиболее перспективными являются конструкции из композитных материалов на термопластичной матрице. Материаловедческим и технологическим научным заданием этого направления исследований могут являться результаты работ по созданию аналогичной природы материалов для арктических наземных условий эксплуатации.

В данной работе приведены результаты исследования термопластичного полимерного композита, армированного волокнами на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) в виде ткани саржевого плетения. Из-за низкой поверхностной энергии волокон возникают проблемы их смачивания и адгезии с полимерными матрицами, приводящих к получению композитов с низкими показателями механических свойств. Поэтому в качестве связующего выбран сополимер полиэтилена и винилацетата (СЭВА), обладающий высоким химическим сродством с СВМПЭ, позволивший решить технологическую проблему совместимости исходных компонентов, обеспечить требуемое адгезионное взаимодействие полимерной матрицы и армирующего волокна, а также высокие показатели физико-механических свойств органокомпозита.

Для формования опытных образцов термопластичного композита СВМПЭ–СЭВА использовали слоистый пакет-заготовку из препрегов с порошковым связующим на поверхности ткани, монолитизация которого осуществлялась методом горячего прессования в металлической оснастке при температуре $110-130^{\circ}\text{C}$.

Определены основные показатели свойств опытных образцов разработанных композитов: теплопроводность, диэлектрические и физико-механические свойства, в условиях нормальной и пониженных температур до -70°C . Обладая низкой плотностью, разработанные композиты, по своим удельным значениям физико-механических свойств не уступают термопластичным стеклокомпозитам.

В дальнейшем планируется исследование процессов разрушения, определение показателей трещиностойкости разработанных органокомпозитов и прогнозирования их долговечности при отрицательных температурах эксплуатации, в том числе для космических условий эксплуатации.

**Thermoplastic polymer composites reinforced with ultra-high molecular weight polyethylene
fibers for space structures**

Bukharov S.V., Vetokhin I.S.

MAI, Moscow, Russia

At present time, elements of orbital stations, meteorological, navigation, geodesic satellite antennas of complex configuration, large-sized unfolding space radio telescopes, power plants, spatial core systems of solar panels and power plants assembled in orbit, panels for relay stations, platforms for

mooring transport spacecraft and other structures, the sizes of which can reach several tens of meters, are used in outer space. For individual parts of such structures, it is reasonable to use carbon composites on a thermosetting matrix with a relatively low density and high specific values of physical and mechanical properties. However, in the range of cosmic temperatures ($-150...+150^{\circ}\text{C}$) such composite materials significantly change the mechanical properties.

The development of fundamentally new spacecraft structures requires the creation of materials with low density, high performance and stability of physical and mechanical properties during space operation at low temperatures. For these goals, the most perspective are constructions made of composite materials on a thermoplastic matrix. The results of work on the creation of a similar nature of materials for Arctic ground conditions of operation can be a material science and technological scientific reserve of this research area.

This paper presents the results of a study of a thermoplastic polymer composite reinforced with fibers based on ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) in the form of twill weave fabric. Because of the low surface energy of the fibers, problems occur with their wetting and adhesion to polymer matrix, leading to the production of composites with low mechanical properties. Therefore, a copolymer of ethylene and vinyl acetate (EVA) was chosen as a binder, which has a high chemical affinity with UHMWPE, which allowed solving the technological problem of compatibility of the source components, providing the required adhesive interaction of the polymer matrix and the reinforcing fiber, as well as high physical and mechanical properties of the organocomposite.

For forming prototypes of the thermoplastic composite UHMWPE-EVA, a layered workpiece made of prepregs with a powder binder on the surface of the fabric was used, the monolithization of which was carried out by hot pressing in metal mold at a temperature of $110-130^{\circ}\text{C}$.

Currently, the main properties of the prototypes of the developed composites have been studied: thermal conductivity, dielectric and physico-mechanical properties, under normal and low temperatures up to -70°C . Having a low density, the developed composites, in their specific values of physical and mechanical properties, are not worse than thermoplastic glass composites.

In the future, it is planned to study the processes of destruction, study the crack resistance of the developed organocomposites and predict their durability at negative operating temperatures, including for space operating conditions.

Функциональные композиционные металл – полимерные материалы с эффектом запоминания формы и сверхупругостью

Виноградов Р.Е., Бурдин Д.В., Гусев Д.Е.

МАИ, г. Москва, Россия

В настоящее время все большее внимание ученых привлекают металл-полимерные композиционные материалы (КМ), в которых проявляется эффект сверхупругости (СУ) и эффект запоминания формы (ЭЗФ) благодаря армированию сплавами на основе никелида титана. Однако в зависимости от свойств используемой полимерной матрицы в каждом конкретном случае необходим свой подход к принципам армирования никелидом титана.

В работе было проведено сравнение механического поведения различных КМ с полимерной матрицей (силиконовая резина, полиэтилен, углепластик), армированной проволокой из никелида титана как в сверхупругом состоянии, так и в состоянии способном накапливать остаточную деформацию по мартенситному механизму с последующим ее восстановлением при последующем нагреве.

В КМ с матрицей из углепластика, характеризующегося высокой жесткостью ($E = 20-60$ ГПа) и низкой пластичностью, реализовать ЭЗФ или ярко выраженное сверхупругое поведение невозможно из-за низкой механической совместимости компонентов КМ, приводящей к их разрушению в области пластических деформаций даже при высокой объемной доле армирующих элементов. В тоже время армирование сверхупругой проволокой повышает упругие характеристики: предел пропорциональности при изгибе и соответствующая ему деформация возрастают в 1,5-2 раза по сравнению с неармированной матрицей. Аналогичные закономерности были получены для КМ с полиэтиленовой матрицей, в которых объемная доля никелида титана меньше 10%. Армирование также приводит к замедлению процессов ползучести в полимерной матрице КМ при длительных статических

или циклических нагрузках. Увеличение объемной доли армирующих элементов свыше 25% позволяет реализовать в КМ с полиэтиленовой матрицей ЭЗФ и сверхупругость на достаточно высоком уровне.

Показано, что матрица из силиконовой резины благодаря низкому модулю упругости ($E = 1-10$ МПа) позволяет создавать КМ с высокими характеристиками СУ и ЭЗФ, уже при небольшой объемной доле армирования (от 3%). Величина обратимой деформации определяется уровнем термомеханических свойств армирующих элементов и их объемной долей. При армировании силиконовой матрицы проволокой, проявляющей ЭЗФ, максимальная обратимая деформация в композите может достигать 40 %, а при армировании сверхупругой проволокой – 20%.

По результатам работы были сформулированы рекомендации по выбору материала матрицы и способа армирования КМ «полимер – никелид титана», обеспечивающие заданный уровень упругих характеристик, а также характеристик ЭЗФ и/или СУ.

Functional composite metal – polymer materials with shape memorization effect and superelasticity

Vinogradov R.E., Burdin D.V., Gusev D.E.

MAI, Moscow, Russia

Currently, more and more attention of scientists is attracted by metal-polymer composite materials (CM), in which the effect of superelasticity (SU) and the effect of shape memorization (SMA) is manifested due to reinforcement with titanium nickelide-based alloys. However, depending on the properties of the polymer matrix used, each case requires its own approach to the principles of titanium nickel reinforcement.

The paper compared the mechanical behavior of various CM with a polymer matrix (silicone rubber, polyethylene, carbon fiber) reinforced with titanium nickelide wire both in a superelastic state and in a state capable of accumulating residual deformation by the martensitic mechanism with its subsequent restoration during subsequent heating.

In KM with a matrix of carbon fiber, characterized by high rigidity ($E = 20-60$ GPa) and low plasticity, it is impossible to implement SMA or pronounced superelastic behavior due to the low mechanical compatibility of KM components, leading to their destruction in the area of plastic deformations even with a high volume fraction of reinforcing elements. At the same time, reinforcement with superelastic wire increases elastic characteristics: the limit of proportionality during bending and the corresponding deformation increase by 1.5-2 times compared to the non-reinforced matrix. Similar patterns were obtained for KM with a polyethylene matrix, in which the volume fraction of titanium nickelide is less than 10%. Reinforcement also leads to a slowdown of creep processes in the polymer matrix of CM under prolonged static or cyclic loads. An increase in the volume fraction of reinforcing elements over 25% makes it possible to implement ESF and superelasticity at a sufficiently high level in KM with a polyethylene matrix.

It is shown that the silicone rubber matrix, due to its low modulus of elasticity ($E = 1-10$ МПа), makes it possible to create KM with high SU and SMA characteristics, even with a small volume fraction of reinforcement (from 3%). The amount of reversible deformation is determined by the level of thermomechanical properties of reinforcing elements and their volume fraction. When reinforcing a silicone matrix with a wire exhibiting SMA, the maximum reversible deformation in the composite can reach 40%, and when reinforced with a superelastic wire – 20%.

Based on the results of the work, recommendations are formulated on the choice of the matrix material and the method of reinforcement of the CM "polymer – titanium nickelide", providing a given level of elastic characteristics, as well as the characteristics of the SMA and / or SU.

Новое приспособление для исследования межслойных сдвиговых характеристик слоистых композитов при комбинированном нагружении

Гусейнов К.А., Кудрявцев О.А., Безмельницын А.В., Сапожников С.Б.

ЮУрГУ, г. Челябинск, Россия

С увеличением доли полимерных композитных материалов (ПКМ) в производстве сложных авиационных конструкций также возрастает сложность условий нагружения. В связи с этим, особенно актуальна задача определения характеристик композитного материала при сложном

напряженном состоянии, которое часто возникает при эксплуатации толстостенных элементов. В таких элементах межслойная прочность является слабым звеном и, следовательно, определяет несущую способность всей конструкции. В то время как характеристики композитов в условиях межслойного сдвига достаточно хорошо изучены, исследования их характеристик при совместном действии сдвиговых и трансверсальных растягивающих/сжимающих напряжений все ещё продолжаются. В настоящее время существует ряд методов экспериментального определения характеристик слоистых пластиков при совместном действии межслойных сдвиговых и трансверсальных напряжений. Однако из-за сложности многоосных испытаний не существует общепринятых методов испытаний для надежного определения характеристик композитов. Таким образом, существует потребность в разработке альтернативных экспериментальных методов, позволяющих исследовать влияние трансверсальных напряжений на межслойную сдвиговую прочность с использованием простого испытательного оборудования.

В данной работе была разработана новая экспериментальная установка для исследования межслойной прочности ПКМ, на примере тканевого углепластика, при совместном действии трансверсального сжатия и межслойного сдвига. Для проведения испытаний были изготовлены образцы специальной формы. За основу была выбрана форма образцов для испытаний по методу Иосипеску. Оптимальные размеры образцов, обеспечивающих равномерность распределения напряжений в рабочей части, были предварительно определены на основе численных расчетов. Метод цифровой корреляции изображений был использован для идентификации вида разрушения и анализа равномерности распределения деформаций по измерительному сечению образца. Для оценки достоверности полученных экспериментальных значений межслойной прочности в условиях комбинированного нагружения был использован критерий разрушения Дэнисла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-19-00377, <https://rscf.ru/project/18-19-00377/>.

A new device for studying the interlaminar shear characteristics of layered composites under combined loading

Guseinov K.A., Kudryavtsev O.A., Bezmelnitsyn A.V., Sapozhnikov S.B.
SUSU, Chelyabinsk, Russia

With increasing the amount of fibre-reinforced plastics (FRPs) in complex aircraft structures, the complexity of loading conditions increases significantly. In this regard, determining the characteristics of FRPs under a complex stress state, which often arises during the operation of thick-walled elements, is of considerable interest. The interlaminar strength in most cases is the weak link and, therefore, determines the bearing capacity of the thick-walled composite structure. While the characteristics of composites under interlaminar shear conditions are well understood, studies of their characteristics under the combined action of shear and transverse tensile/compressive stresses are still ongoing. Nowadays, there are several methods for the experimental determination of the characteristics of layered composites under the combined action of interlaminar shear and transverse stresses, but there are no generally accepted test methods due to the complexity of multiaxial testing. Thus, there is a need to develop alternative experimental methods to study the effect of transverse stresses on interlaminar shear strength using relatively simple test equipment.

In this research, a new experimental setup was developed to study FRP interlaminar strength under the combined action of transverse compression and interlaminar shear. Fabric-based CFRP was used as a test material. Specimens of a special shape were prepared for the testing. The specimen shape similar to that for Iosipescu tests was chosen as a basis. The dimensions of the specimens ensuring the uniformity of stress distribution on the working section were preliminarily determined during numerical simulations. The digital image correlation (DIC) method was utilised to identify the failure mode and to analyse the strain distribution over the specimen during verification experiments. Daniel's failure criterion was used to assess the reliability of the obtained experimental values of interlaminar strength under combined loading conditions.

This work was financially supported by Russian Science Foundation (project No. 18-19-00377).

Суперконструкционные материалы на основе термотропных преполимеров

Дебердеев Т.Р.

КНИТУ, г. Казань, Россия

Термотропные ароматические полиэфиры известны как класс полимерных материалов с исключительно высокой термической стабильностью, химической стойкостью и незначительным коэффициентом термического расширения. Вследствие наличия в основной цепи мезогенных жесткоцепных блоков, данные полимеры формируют нематическую фазу при повышенных температурах. При переработке из расплавов термотропные полимеры подвержены процессу ориентации макромолекул с дальнейшим самоупрочнением при охлаждении, что объясняет высокие значения модуля упругости и прочности. Современные исследования, проводимые в области термотропных полимеров, охватывают новые разработки по термореактивным связующим, материалам для аддитивных технологий и биовозобновляемым материалам.

Настоящая работа проводилась с целью получения ряда термотропных полимеров различного строения, оценки влияния их структуры на мезоморфные свойства и термическую стабильность.

Синтез термотропных ароматических полиэфиров проводился путем высокотемпературной поликонденсации в присутствии катализатора перэтерификации. Были получены серии полимеров на основе 4-гидроксibenзойной кислоты, гидрохинона и изофталевой кислоты (P-1) или 4,4'-оксисбензойной кислоты (P-2), а также на основе 4-гидроксibenзойной кислоты, терефталевой кислоты и бисфенола А (P-3) или 1,5-нафталиндииола (P-4). Методом ИК-спектроскопии оценивалась химическая структура полимеров, которая свидетельствовала о включении всех мономеров, используемых в реакции, в состав макромолекул. Молекулярная масса полученных соединений оценивалась по данным ИК-спектроскопии методом концевых групп и принимала значения до 5000, что указывает на олигомерную природу образцов.

Согласно данным дифференциальной сканирующей калориметрии и оптической поляризационной микроскопии, олигомер P-1 переходил в ЖК состояние в интервале температур 140-170°C, в случае P-3 мезофаза существовала в диапазоне 150-250°C. Олигомер P-2 находился в ЖК состоянии в интервале 140-250°C, а для P-4 эндотермы фазовых переходов наблюдались при 110 и 290°C.

По данным термогравиметрического анализа для процесса термодеструкции образцов определяли температуру начала процесса, температуру максимальной скорости термодеструкции и энергию активации. В среднем, термическая стабильность олигомеров варьировалась в диапазоне 200-250°C, что было связано как с химической природой макромолекулы, так и с концентрацией концевых групп.

Дальнейшая переработка термотропных олигомеров в готовые изделия возможна путем дальнейшего повышения молекулярной массы в процессе твердофазной пост-поликонденсации или химическим способом при добавлении удлинителей цепи.

High-performance materials based on thermotropic prepolymers

Deberdeev T.R.

KNRTU, Kazan, Russia

Thermotropic aromatic polyesters are known as a class of polymeric materials with extremely high thermal stability, chemical resistance and low coefficient of thermal expansion. Due to the presence of mesogenic rigid-chain blocks in the main chain, these polymers form a nematic phase at elevated temperatures. When processed from melts, thermotropic polymers undergo a process of orientation of macromolecules with further self-strengthening upon cooling, which explains the high values of the modulus of elasticity and strength. Current research in the field of thermotropic polymers implies new developments in thermosets, materials for additive manufacturing and biorenewable materials.

This work was carried out with the aim of obtaining a number of thermotropic polymers of various structures, assessing the effect of their structure on mesomorphic properties and thermal stability.

The synthesis of thermotropic aromatic polyesters was carried out by high-temperature polycondensation in the presence of a transesterification catalyst. A series of polymers based on 4-hydroxybenzoic acid, hydroquinone and isophthalic acid (P-1) or 4,4'-hydroxybis(benzoic acid) (P-

2) were synthesized, as well as ones composed of 4-hydroxybenzoic acid, terephthalic acid and bisphenol A (P-3) or 1,5-naphthalene diol (P-4). The chemical structure of the polymers was estimated by IR spectroscopy, which indicated the inclusion of all monomers used in the reaction in the macromolecules. The molecular weight of the obtained compounds was estimated from the data of IR spectroscopy by the end-group analysis and reached values up to 5000, pointing to the oligomeric nature of the samples.

According to the data of differential scanning calorimetry and optical polarization microscopy, oligomer P-1 passed into the LC state in the temperature range 140-170°C; in the case of P-3, the mesophase existed in the range 150-250°C. Oligomer P-2 was in the LC state in the range 140-250°C, while for P-4 the endotherms of phase transitions were observed at 110 and 290°C.

According to the data of thermogravimetric analysis for the process of thermal destruction of samples, the temperature of the beginning of the process, the temperature of the maximum rate of thermal destruction, and the activation energy were determined. On average, the thermal stability of oligomers varied in the range 200-250°C, which was associated with both the chemical nature of the macromolecule and the concentration of the end groups.

Further processing of thermotropic oligomers into the products is possible by increasing the molecular weight in the process of solid-phase post-polycondensation or chemically with the addition of chain extenders.

Применение расчетно-экспериментального анализа демпфирующих свойств для идентификации параметров композиционного материала

Еремин В.П., Больших А.А., Гусева Е.Е.

МАИ, г. Москва, Россия

Цель настоящей работы – разработка методики определения демпфирующих и модальных параметров модели поведения ПКМ по результатам экспериментального анализа. Модель материала – слоистый композит с ортотропными линейно упругими слоями. Задача идентификации параметров модели материала рассматривается как задача минимизации расхождения расчетных собственных частот с экспериментальными. Для ее решения используется метод квазислучайного поиска.

Для моделирования демпфирующих свойств материала используется модель демпфирования Релея. Основное преимущество данного метода заключается в том, что он моделирует параметры демпфирования для материала, а не для определенной конструкции, т.е. определив параметры демпфирования для данного образца, можно использовать данную модель для расчета других конструкций, изготовленных из данного материала.

Для определения коэффициентов пропорциональности α и β необходимо провести модальный расчет для определения собственных частот образца, соответствующих двум различным последовательным формам колебаний. Подход включает в себя численные и аналитические методы моделирования.

1. Laxalde D., Thouverez F., Sinou J.-J., Lombard J.-P., Baumhauer S. Mistuning identification and model updating of an industrial blisk. *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2007, Article ID 17289, 10 p. DOI: 10.1155/2007/17289

2. Расчетно-экспериментальные исследования собственных частот и форм колебаний лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов / М.А. Гринев, А.Н. Аношкин, П.В. Писарев, Г.С. Шипунов, М.Ш. Нихамкин, А.А. Балакирев, И.П. Конев, А.А. Головкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 4. – С. 106–119.

3. Ефимик В.А. Применение метода конечных элементов к задаче собственных колебаний прямоугольных пластин и цилиндрических оболочек // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 38. – С. 72–92.

4. Сковрцов Ю.В. Конспект лекций по дисциплине механика композиционных материалов / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2013. – 94 с.

Application of computational and experimental analysis of damping properties to identify the parameters of a composite material

Eremin V.P., Bolshikh A.A., Guseva E.E.

MAI, Moscow, Russia

The purpose of this work is to develop a technique for determining the damping and modal parameters of the PCM behavior model based on the results of experimental analysis. The material model is a layered composite with orthotropic linear elastic layers. The problem of identifying the parameters of a material model is considered as the problem of minimizing the discrepancy between the calculated natural frequencies and the experimental ones. To solve it, the method of quasi-random search is used. A Rayleigh damping model is used to model the damping properties of a material. The main advantage of this method is that it simulates the damping parameters for the material and not for a specific structure, i.e. having determined the damping parameters for a given sample; you can use this model to calculate other structures made of this material. To determine the proportionality coefficients α and β , it is necessary to carry out a modal calculation to determine the natural frequencies of the sample corresponding to two different successive modes of vibration. The approach includes numerical and analytical modeling techniques.

1. Laxalde D., Thouverez F., Sinou J.-J., Lombard J.-P., Baumhauer S. Mistuning identification and model updating of an industrial blisk. International Journal of Rotating Machinery, vol. 2007, Article ID 17289, 10 p. DOI: 10.1155/2007/17289.

2. Grinev M.A., Anoshkin A.N., Pisarev P.V., Shipunov G.S., Nikhamkin M.Sh, Balakirev A.A., Konev I.P., Golovkin A.A. Raschetno-eksperimentalnye issledovaniya sobstvennykh chastot i form kolebaniy lopatki spryamlyayushchego apparata iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Calculation and experimental studies of the natural frequencies and vibration modes of the blade of a rectifying apparatus made from polymer composite materials]. Vestnik PNRPU. Mekhanika, 2016, no. 4, pp. 106-119.

3. Efimik V.A. Primenenie metoda konechnykh elementov k zadache sobstvennykh kolebaniy pryamougolnykh plastin i tsilindricheskikh obolochek [The application of the finite element method to the problem of general oscillations of rectang.

4. Skvortsov Yu.V. Konspekt lektsiy po distsipline mekhanika kompozitsionnykh materialov [Lecture notes on the discipline of the mechanics of composite materials]. Samara. SGAU, 2013, 94 p.

Влияние предварительного циклического изгиба на остаточную прочность и жесткость композитного материала

Жихарев М.В.

ЮУрГУ, г. Челябинск, Россия

В рамках исследования были изготовлены образцы из стеклопластика СТЭФ толщиной 4 мм, имеющие форму балки равной прочности, для испытаний на циклический знакопеременный изгиб. Испытания были проведены на вибростенде LDS V780 с использованием специально разработанной оснастки. Испытания были проведены при двух частотах 5 и 20 Гц и трех различных амплитудах 3 мм, 5 мм и 7 мм. Для каждой частоты и амплитуды исследовалось различное число циклов нагружения: 100, 500, 1000, 2500, 5000, 7500, 10000, 15000. После проведения испытаний на знакопеременный изгиб были проведены испытания по определению остаточной прочности и жесткости при трехточечном изгибе. Были получены зависимости предела прочности и модуля упругости образцов от количества циклов предварительного нагружения. Тенденция по снижению остаточной прочности и жесткости проявляется тем отчетливее, чем больше амплитуда предварительной нагрузки и достигает 41% при амплитуде 7 мм. Это связано с тем, что при больших амплитудах идет интенсивное накопление рассеянных микрповреждений в наружных слоях композита. При амплитудах 3 и 5 мм частота нагружения практически не оказывала влияние на процесс накопления рассеянных микрповреждений в образцах, и зависимости остаточных изгибных прочности и жесткости от количества циклов практически не отличаются. При амплитуде 7 мм различия уже ярко выражены и существенно превосходят экспериментальный разброс. Было предположено, что на процесс накопления рассеянных микрповреждений в композите при циклическом нагружении влияет явление саморазогрева.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-19-00377, <https://rscf.ru/project/18-19-00377/>.

Influence of preloading cyclic bending on the residual strength and stiffness of a composite material

Zhikharev M.V.

SUSU, Chelyabinsk, Russia

As part of the study, specimens of GFRP, having the shape of a beam of equal strength, were made for testing for cyclic alternating bending. The tests were carried out on an LDS V780 shaker using specially designed equipment. The tests were conducted at two frequencies of 5 and 20 Hz and three different amplitudes of 3 mm, 5 mm and 7 mm. For each frequency and amplitude, a different number of loading cycles was investigated: 100, 500, 1000, 2500, 5000, 7500, 10000, 15000. After testing for alternating bending, the residual strength and stiffness tests at three-point bending were carried out. The dependences of the tensile strength and elastic modulus of the samples on the number of preloading cycles were obtained. The tendency to decrease the residual strength and stiffness become clearer, the larger the preload amplitude and reaches 41% at an amplitude of 7 mm. This is because, at high amplitudes, there is an intensive accumulation of scattered microdamages in the outer layers of the composite. At amplitudes of 3 and 5 mm, the loading frequency had practically no effect on the accumulation of scattered microdamages in the samples, and the dependences of the residual bending strength and stiffness on the number of cycles did not practically differ. At an amplitude of 7 mm, the differences are already pronounced and significantly exceed the experimental scatter. It was assumed that the process of accumulation of scattered microdamages in the composite under cyclic loading is influenced by the phenomenon of self-heating.

This work was financially supported by Russian Science Foundation (project No. 18-19-00377), <https://rscf.ru/project/18-19-00377/>.

Робастное проектирование при FDM 3d-печати деталей и узлов самолетов и БПЛА из полимерных композитных материалов

Загидуллин Р.С., Дмитриев А.Я.

Самарский университет, г. Самара, Россия

С появлением новых полимерных композитных материалов, армированных углеродом и металлическими порошками, технология FDM (Fused deposition modeling) 3D-печати с каждым годом находит все более широкое применение в производстве деталей и узлов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и самолетов. Технология FDM 3D-печати заключается в построении 3D-модели из расплавленной полимерной нити, которая поступает через печатающую головку на рабочий стол. Достоинством FDM 3D-печати в производстве БПЛА и самолетов является возможность изготавливать детали и узлы практически любой геометрической формы без потери прочностных характеристик, то есть возможность применения бионического метода проектирования [1].

Но необходимо отметить, что вместе с возможностями, которые обеспечивает FDM 3D-печать из полимерных композитных материалов, возникают и новые проблемы, среди которых: формо- и размеронестабильность конструкции, деформация (коробление) конструкции, обусловленного влиянием тепловых напряжений, образование разрывов внутри конструкции и другие. Указанные проблемы очевидно влияют на получение устойчивых выходных характеристик конструкции.

Для получения конструкции из полимерных композитных материалов с устойчивыми выходными характеристиками в условиях аддитивного производства возникает необходимость разработать модель управления качеством, которая позволит обеспечить сквозное развертывание требований и качества системы проектирования и изготовления (FDM 3D-печати).

Разработана модель управления качеством деталей и узлов из полимерных композитных материалов в условиях аддитивного производства на основе международных и робастных подходов. На стадии проектирования использованы следующие робастные подходы и методы: развертывание функции качества QFD, анализ видов и последствий потенциальных несоответствий конструкции (DFMEA); на стадии изготовления (FDM 3D-печати): метод

анализа «дерева отказов», анализ видов и последствий потенциальных отказов оборудования (MFMEA), анализ видов и последствий потенциальных несоответствий процесса (PFMEA) и метод робастного проектирования Тагути.

Литература:

1. R Zagidullin, D Antipov, A Dmitriev and N Zezin Development of a methodology for eliminating failures of an FDM 3D printer using a “failure tree” and FMEA analysis. In: Journal of Physics: Conference Series 1925 (2021) 012085. doi:10.1088/1742-6596/1925/1/012085.

Robust design for FDM 3D printing of aircraft and UAV parts and assemblies from polymer composite materials

Zagidullin R.S., Dmitriev A.Ya.

Samara University, Samara, Russia

With the advent of new polymer composite materials reinforced with carbon fiber and metal powders, FDM (Fused deposition modeling) 3D printing technology is increasingly used every year in the production of parts and assemblies for unmanned aerial vehicles (UAVs) and aircraft. FDM 3D printing technology consists in building a 3D model from a molten polymer filament, which flows through the print head onto the desktop. The advantage of FDM 3D printing in the production of UAVs and aircraft is the ability to produce parts and assemblies of almost any geometric shape without loss of strength characteristics, that is, the possibility of using the bionic design method [1].

But it should be noted that along with the possibilities provided by FDM 3D printing from polymer composite materials, new problems arise, including: shape and size instability of the structure, deformation (warping) of the structure due to the influence of thermal stresses, the formation of ruptures within the structure, and other. These problems obviously affect the obtaining of stable output characteristics of the structure.

To obtain a structure from polymer composite materials with stable output characteristics in conditions of additive manufacturing, it becomes necessary to develop a quality management model that will ensure end-to-end deployment of the requirements and quality of the design and manufacturing system (FDM 3D printing).

A model has been developed for quality control of parts and assemblies made of polymer composite materials in conditions of additive manufacturing based on international and robust approaches. At the design stage, the following robust approaches and methods were used: Quality Function Deployment (QFD), Design Failure Mode and Effects Analysis (DFMEA); at the manufacturing stage (FDM 3D Printing): Failure Tree Analysis Method, Machinery Failure Mode and Effects Analysis (MFMEA), Process Failure Mode and Effects Analysis (PFMEA), and Taguchi Robust Design Method.

References:

1. R Zagidullin, D Antipov, A Dmitriev and N Zezin Development of a methodology for eliminating failures of an FDM 3D printer using a “failure tree” and FMEA analysis. In: Journal of Physics: Conference Series 1925 (2021) 012085. doi:10.1088/1742-6596/1925/1/012085.

Исследование механических свойств композиционных материалов на основе карбонизованных полимерных матриц

¹Игнатьев С.Д., ²Статник Е.С., ¹Степашкин А.А.

¹НИТУ МИСИС, ²Сколтех, г. Москва, Россия

Композиционные материалы на основе эластомерных матриц, подвергнутых низкотемпературной карбонизации, представляют большой интерес для исследований и являются перспективным направлением в современном материаловедении. Имеющиеся на данный момент композиты, обладающие полимерными матрицами, имеют достаточно низкие тепловые режимы эксплуатации, варьирующиеся в пределах от 150 до 200°C. Также существующие на данный момент полимеры, позволяющие сформировать материал с более высокими температурными режимами работы, представлены достаточно немногочисленной группой, включающей в себя фенольные смолы, полиэфирэфиркетоны, полиимиды и фталонитрилы [1, 2]. Однако, такие материалы обладают рядом существенных недостатков, а именно: высокая стоимость и отсутствие серийного производства на территории Российской Федерации, что значительно увеличивает цену готовой продукции.

В настоящее время на базе НИТУ «МИСиС» ведется разработка новых композиционных материалов на основе эластомерных матриц, подвергнутых низкотемпературной карбонизации. Использование различных дискретных наполнителей (углеродное волокно, карбид кремния, графит и другие) позволяет сформировать композиционные материалы с высокими физико-механическими, тепловыми и трибологическими свойствами для эксплуатации в определенных условиях.

Предлагаемый подход производства композиционных материалов позволяет значительно снизить стоимость готовых изделий за счет использования доступного и дешевого сырья, а также, использования технологии производства резинотехнических изделий, позволяющей получать изделия готовой формы еще на начальной стадии производства.

Актуальной научно-исследовательской задачей выступает исследование и анализ целого ряда механических характеристик, таких как: прочность, трещиностойкость, а также величина внутренних напряжений, возникающих в полимерном композите на различных производственных стадиях. Точное определение вышеуказанных характеристик позволит сформировать предельные эксплуатационные режимы функционирования материала и снизить степень изменения его геометрии в процессе производственного цикла.

1. Nair, C.P.R. Advances in addition-cure phenolic resins // Prog. Polym. Sci. 2004, №29, p. 401–498.

2. Iwakura, Y., Uno, K., Takiguchi, T. Syntheses of aromatic polyketones and aromatic polyamide // J. Polym. Sci. 1968, №6, p. 3345–3355.

Investigation of mechanical properties of composite materials based on carbonized polymer matrices

¹Ignatyev S.D., ²Statnik E.S., ¹Stepashkin A.A.

¹NUST MISIS, ²Skoltech, Moscow, Russia

Composite materials based on elastomeric matrices subjected to low-temperature carbonation are of great interest for research and are a promising direction in modern material science. Currently available composites with polymer matrices have sufficiently low thermal operating conditions, ranging from 150 to 200 C. Also, currently, existing polymers that allow the formation of a material with higher temperature modes of operation are represented by a rather small group, including phenolic resins, polyether etherketones, polyimides and phthalonitriles [1, 2]. However, such materials have a number of significant disadvantages, namely: high cost and lack of mass production in the territory of Russian Federation, which significantly increases the price of finished products.

Currently, new composite materials based on elastomeric matrices subjected to low-temperature carbonation are being developed on the basis of NUST MISIS. The use of various discrete fillers (carbon fiber, silicon carbide, graphite and others) makes it possible to form composite materials with high physicomachanical, thermal and tribological properties for operation under certain conditions.

The proposed approach to the production of composite materials makes it possible to significantly reduce the cost of finished products through the use of affordable and cheap raw materials, as well as the use of technology for the production of rubber products, which allows to obtain finished products at the initial stage of production.

An urgent research task is the study and analysis of a number of mechanical characteristics, such as: strength, fracture toughness, as well as the magnitude of internal stresses arising in a polymer composite at various production stages. Accurate determination of the above characteristics will allow to form the maximum operating modes of the material and reduce the degree of geometry changings during the production cycle.

1. Nair, C.P.R. Advances in addition-cure phenolic resins // Prog. Polym. Sci. 2004, №29, p. 401–498.

2. Iwakura, Y., Uno, K., Takiguchi, T. Syntheses of aromatic polyketones and aromatic polyamide // J. Polym. Sci. 1968, №6, p. 3345–3355.

Методика оценки ошибки измерения величины потерь энергии в обтекателях сферической или сфероцилиндрической формы

Ларин А.А.

МАИ, г. Москва, Россия

В известных методах измерения величины потерь в обтекателях принято, что измеряемый сегмент (зона обтекателя, находящаяся перед измерительной антенной в процессе измерения) имеет плоскую форму. Однако, обтекатели, в большинстве случаев, проектируются с учетом того, что его, в процессе эксплуатации, должна обтекать внешняя среда, в следствие этого, он содержит криволинейные поверхности. На практике широкое применение получили обтекатели сферической или сфероцилиндрической формы.

При проведении измерений величины потерь энергии, вносимых такими обтекателями, в следствии их кривизны, плоская электромагнитная волна (ЭМВ) будет иметь разный путь и угол падения в центре и на краях измеряемого сегмента, что неизбежно вносит дополнительную ошибку в результаты измерений.

Распространение ЭМВ в пространстве зависит от ряда факторов (диэлектрических свойств среды распространения, угла падения ЭМВ на границу раздела двух сред и др.). При проведении контроля сферического или сфероцилиндрического обтекателя, ЭМВ проходит по нормали только в центре измеряемого сегмента. В остальных точках, из-за кривизны стенки, ЭМВ приходит под углом. При прохождении волны под углом, увеличивается толщина стенки и, следовательно, путь волны в данной точке. Эти факторы оказывают отрицательное влияние на точность проведения измерений величины потерь.

Для упрощенной оценки влияния кривизны обтекателя на результат измерения величины потерь, рассматривается прохождения ЭМВ (расчет величины потерь) в двух точках, соответствующих центру и краю, измеряемого сегмента. Приводится расчет величин потерь в указанных выше точках. По полученным данным оценивается величина вероятно вносимой ошибки в результат измерения величины потерь при измерении обтекателей сферической или сфероцилиндрической формы. Даются рекомендации по уменьшению величины вносимой ошибки.

Methodology for estimating the error of measuring of energy loss in spherical or spherical-cylindrical radomes

Larin A.A.

MAI, Moscow, Russia

In the known methods of measuring radome loss, it is assumed that the segment to be measured (the area of the radome in front of the measurement antenna during the measurement process) has a flat shape. However, radomes, in most cases, are designed on the assumption that it has to be flown by the external environment during operation, hence, it contains curvilinear surfaces. In practice, radomes of spherical or spherical-cylindrical shape are widely used.

When measuring the magnitude of energy loss brought by such radomes, due to their curvature, a plane electromagnetic wave (EMW) will have a different path and angle of incidence in the center and on the edges of the measured segment, which inevitably introduces an additional error in the measurement results.

EMW propagation in space depends on a number of factors (dielectric properties of the propagation medium, the angle of incidence of EMW on the interface between two media, etc.). When controlling a spherical or spherical-cylindrical radomes, the EMW passes along the normal only in the center of the measured segment. In other points, due to the curvature of the wall, the EMW comes at an angle. As the wave travels at an angle, the wall thickness and therefore the path of the wave at that point increases. These factors have a negative effect on the accuracy of loss measurements.

For a simplified assessment of the influence of radomes curvature on the result of loss measurement, we consider the EMW transmission (loss calculation) in two points corresponding to the center and the edge of the measured segment. Calculation of losses in the above points is given. According to the obtained data, the value of probable introduced error in the result of loss value measurement at measurement of radomes of the spherical or spherical-cylindrical form is estimated. Recommendations on reduction of the value of the introduced error are given.

Экспериментальное исследование методов снижения эффективного коэффициента концентрации напряжений в полимерных композитных материалах

Лешков Е.В., Оливенко Н.А., Кудрявцев О.А.

ЮУрГУ, г. Челябинск, Россия

Снижение влияния концентрации напряжений на прочность полимерных композитных материалов по-прежнему остается актуальной задачей при разработке и проектировании новых ответственных высоконагруженных конструкций. Межслоевая гибридизация – комбинирование в одном пакете слоев с различной деформацией разрушения – в ряде случаев позволяет проектировать композиты, малочувствительные к дефектам. Однако, в процессе деформирования таких материалов наблюдается не только накопление повреждений в одном из компонентов, но и межслойные разрушения. В частности, разрушение слоев углепластика в составе гибридов на основе угле- и стеклоткани может приводить к обширным расслоениям. В этом случае дальнейшая эксплуатация изделий зачастую оказывается невозможной вследствие резкого снижения несущей способности конструкции. Помимо этого, гибридизация также может приводить к снижению интегральных характеристик прочности пакета относительно исходных материалов.

Целесообразность применения гибридизации напрямую зависит от методики проектирования композитного материала и использованных при его изготовлении технологических приемов. В данной работе рассмотрены гибридные композитные материалы с выраженной площадкой псевдотекучести, армированные стекло- и углетканями. В ходе работы было исследовано влияние характера диаграммы деформирования, укладки слоев жесткого компонента и тонких полимерных вуалей на эффективный коэффициент концентрации напряжений. Для проектирования укладок использовался ранее разработанный программный продукт FARGR-2. Установлено, что материалы без выраженного участка упрочнения после площадки псевдотекучести на диаграмме деформирования менее чувствительны к дефектам в виде сквозных отверстий при растяжении. Отмечено снижение разрушающих напряжений для ПКМ, в которых слои жесткого компонента располагаются ближе к поверхности. Помимо этого, продемонстрировано повышение стабильности разрушения гибридного композитного материала с помощью поворота слоев углепластика на угол 10° и использования тонких полимерных вуалей между ними.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-19-00377 <https://rscf.ru/project/18-19-00377/>.

Methods for reduction of effective stress concentration factor in polymer composite materials: Experimental study

Leshkov E.V., Olivenko N.A., Kudryavtsev O.A.

SUSU, Chelyabinsk, Russia

The reduction of stress concentration effect on the composite material strength is still a significant problem during the development and design of new critical high-load structures. Interlayer hybridization, which is a combination of layers with different failure strains in the laminate, allows to design composites with defects insensitivity in some cases. However, not only the damage accumulation but also interlayer fracture are observed in one of the laminate components during the loading of such materials. In particular, the rupture of CFRP layers can lead to extensive delamination in GFRP/CFRP hybrids. In this case, further structure exploitation is often impossible due to a significant bearing capacity decline. In addition, hybridization can also lead to a decrease of the laminate integral strength characteristics in comparison with the origin materials.

The hybridization feasibility directly depends on the methodology of composite material design and the technological methods being used during the manufacturing process. In this work, hybrid composite materials with extended pseudo-ductile area based on glass and carbon fabrics were studied. The influence of stress-strain curve, low-strain component position in a laminate layup, and thin polymer veils on the effective stress concentration factor was researched. The previously developed software FARGR-2 was used for layup design. It was found that materials without extended strain hardening area on the stress-strain curve were less sensitive to hole defects in tension tests. Also, failure stresses decrease was observed for composite materials with stacking sequence where low-strain layers were close to the outer surface of the laminate. In addition, the placement of

CFRP layers at small angles (no more than $\pm 10^\circ$) to warp direction and using thin polymer veils between them led to an increase in the hybrids fracture stability.

This work was financially supported by Russian Science Foundation (project No. 18-19-00377). <https://rscf.ru/project/18-19-00377/>.

Климатическое старение полимерного композита на основе эпоксивинилэфирного связующего

Мальшьева Д.П., Проценко А.Е.

КнАГУ, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

В области анализа влияния климатического старения значительная доля работ в России выполнена в ФГУП ВИАМ [1-2]. Большое значение в данных работах уделяется параметрам долговечности полимерных композитов в условиях атмосферы теплого влажного и умеренно теплого климата, рассмотрено влияние длительных статических нагрузок на темпы старения в условиях природных и лабораторных испытаний. Проблемой в данной области является отсутствие систематических данных о поведении полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных климатических зонах.

В рамках выполненной работы проводились климатические натурные и ускоренные испытания ПКМ на территории Хабаровского края Дальнего Востока.

Исследовались стеклопластики, выполненные методом вакуумной инфузии из эпоксивинилэфирного связующего Derakane 411-350 и полотняной стеклоткани ХК Композит Ст-62004. Образцы подвергались постотверждению при температуре 120 °С в течении 2 часов, после чего отправлялись на испытания.

Установлено, что в условиях натурной экспозиции в первые 4 месяца образца незначительно упрочняются. Предел прочности при статическом изгибе увеличился на 1,7 %. При дальнейшей экспозиции прочностные свойства снижаются на 3 % от пикового значения.

Ускоренные испытания проводились в условиях тепловлажностного старении образцов. Доупрочнение стеклопластиков при этом достичь за 59 ч при температуре 50 °С.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00246

Литература:

1. Lebedev M. P., Startsev O. V., Kychkin A. K. The effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics //Heliyon. – 2020. – Т. 6. – №. 3. – С. e03481.

2. Startsev O. V., Krotov A. S., Golub P. D. Effect of climatic and radiation ageing on properties of glass fibre reinforced epoxy laminates //Polymers & polymer composites. – 1998. – Т. 6. – №. 7. – С. 481-488.

Climatic aging of polymer composite based on epoxy vinyl ester binder

Malysheva D.P., Protsenko A.E.

KnASTU, Komsomolsk-on-Amur, Russia

In the field of analysis of the influence of climatic aging, a significant part of the work in Russia was carried out at All-Russian Institute of Aviation Materials [1-2]. Much importance in these works is given to the parameters of the durability of polymer composites in an atmosphere of a warm humid and moderately warm climate, the influence of long-term static loads on the aging rate under conditions of full-scale and laboratory tests is considered.

In the presented work performed climatic full-scale and accelerated tests of PCM. All experiments were carried out on the Khabarovsk Territory of the Far East.

Fiberglass reinforced plastics Investigated in work were made by the vacuum assisted resin transfer molding (VaRTM) of epoxy vinyl ether binder Derakane 411-350 and linen fiberglass HC Composite St-62004. The samples were post-cured at a temperature of 120°C for 2 hours, after which they were sent for testing.

Fiberglass reinforced plastic samples hardened in the first 4 months under conditions of full-scale climatic exposure. The bending strength increased by 1.7%. With further exposure, the strength properties decrease by 3% from the peak value.

Accelerated tests were carried out under conditions of heat and moisture aging of the samples. In this case, additional strengthening of fiberglass plastics can be achieved in 59 hours at 50°C.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 21-79-00246.

References:

1. Lebedev M. P., Startsev O. V., Kychkin A. K. The effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics //Heliyon. – 2020. – Т. 6. – №. 3. – С. e03481.
2. Startsev O. V., Krotov A. S., Golub P. D. Effect of climatic and radiation ageing on properties of glass fibre reinforced epoxy laminates //Polymers & polymer composites. – 1998. – Т. 6. – №. 7. – С. 481-488.

Исследование факторов, вызывающих коробление конструкций из полимерно-композиционных материалов на углеродной основе, полученных методом высокотемпературного формования

¹Некравцев Е.Н., ¹Сафонов К.С., ²Огурцов П.С.

¹ВГТУ, ²Филиал ПАО «Ил» - ВАСО, г. Воронеж, Россия

В Воронежском ГТУ ведутся работы по исследованию и анализу причин возникновения коробления панелей аэродинамических поверхностей летательных аппаратов, изготовленных из современных отечественных полимерно-композиционных материалов (ПКМ) на основе стекло- и углеармирующих волокон и высокотемпературных связующих, в процессе автоклавного формования.

Цель работы: анализ причин возникновения и поиск вариантов устранения коробления конструкций из ПКМ на углеродной основе, изготовленных по препреговой технологии и выполняющих функции аэродинамических поверхностей современных отечественных авиалайнеров.

Рассмотрен однонаправленный препрег на углеродной основе КМКУ.2М.120.Э.0145, для которого:

а) выявлены факторы, влияющие на возникновение и величину коробления (поводку) монолитных и многослойных (сотовых) конструкций из ПКМ на указанном препреге;

б) рассмотрены плоские образцы, проведен подбор схем равновесной укладки монолитных обшивок;

в) проведен сравнительный анализ поведения монолитных обшивок, полученных из однонаправленных препрегов на стеклянной и углеродной основах после термической полимеризации связующего;

г) подобрана равновесная укладка обшивок многослойных (сотовых) панелей из препрегов на углеродной основе и сотового заполнителя ПСП-1-2,5П-64 на плоских образцах;

Исследования проводились на плоских образцах. Для и формования образцов применялось оборудование в составе: пресс лабораторный Langzaunerperfect LZT-UK-25-L с термостатом и пресс лабораторный Langzaunerperfect LZT-UK-25-L с электронагревом.

Температура формования образцов назначалась в строгом соответствии с режимами полимеризации связующего препрега и составляла $180 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение $3,0 \pm 0,5$ ч. Давление формования назначалось в соответствии с конструкцией образцов и составляло: $5,5 \pm 0,5$ кгс/см² для монолитных и $2,5 \pm 0,5$ кгс/см² для многослойных (сотовых) образцов.

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

а) коробление образцов происходит вдоль направления неуравновешенной усадки связующего-это направление в плоскости материала, перпендикулярное основе;

б) влияние направления растяжки сот сотового заполнителя на величину и направление коробления для многослойных (сотовых) образцов не выявлено;

в) для сбалансированной укладки монолитной конструкции, необходима ее компенсация симметричными монослоями относительно центрального монослоя (0/90/0; 90/0/90; +45/90/-45/0/-45/90/+45) или симметричная укладка монослоев без центрального слоя (+45/90/-45/0/0/-45/90/+45), причем количество слоев не ограничено;

г) укладка монослоев, типа 0/90; +(-)45/0; +(-)45/90; +45/-45 сбалансированной не является и приводит к короблению, причем, укладка монослоев +45/-45 является наиболее неуравновешенной и приводит к максимальному диагональному короблению;

д) сравнительный анализ поведения монолитных образцов, полученных из однонаправленных препрегов на стеклянной и углеродной основах после термической полимеризации связующего показал идентичность направления коробления, причем величина коробления конструкций из препрегов на углеродной основе оказалась на 7-10% меньше;

е) получены равновесные многослойные (сотовые) конструкции с укладкой в два перехода: первый переход (+45/90/-45/0/ПСП) – наблюдался сильный винт после режима; второй переход (наклеивание на ПСП слоев 0/-45/90/+45 и общая схема образца +45/90/-45/0/ПСП/0/-45/90/+45) – получен идеально ровный образец, т.е. в многослойных образцах необходима симметрия относительного сотового заполнителя, как центрального слоя.

Investigation of factors causing warpage of structures made of polymer-composite materials on a carbon basis, obtained by high-temperature molding

¹Nekravtsev E.N., ¹Safonov K.S., ²Ogurtsov P.S.

¹VSTU, ²PJSC “II” - VASO Branch, Voronezh, Russia

At the Voronezh STU, work is underway to research and analyze the causes of warping of aerodynamic surface panels of aircraft made of modern domestic polymer composite materials (PCM) based on glass and carbon reinforcing fibers and high-temperature binders during autoclave molding.

Purpose of the work: analysis of the causes of occurrence and search for options for eliminating warpage of structures made of PCM on a carbon basis, manufactured using prepreg technology and performing the functions of aerodynamic surfaces of modern domestic airliners.

A unidirectional carbon-based prepreg KMKU.2M.120.E.0145 is considered, for which:

a) the factors influencing the occurrence and magnitude of warpage (leash) of monolithic and multilayer (honeycomb) structures made of PCM on the indicated prepreg were identified;

b) flat samples were considered, the selection of schemes for equilibrium laying of monolithic skins was carried out;

c) a comparative analysis of the behavior of monolithic skins obtained from unidirectional prepreps on glass and carbon bases after thermal polymerization of the binder was carried out;

d) an equilibrium laying of skins of multilayer (honeycomb) panels made of carbon-based prepreps and PSP-1-2.5P-64 honeycomb filler was selected on flat samples;

Investigations were carried out on flat specimens. For the molding of the specimens, the equipment was used consisting of a laboratory press Langzaunerfect LZT-UK-25-L with a thermostat and with electric heating.

The molding temperature of the samples was set in strict accordance with the polymerization modes of the binder prepreg and was $180 \pm 5^\circ\text{C}$ for $3.0 \pm 0.5\text{h}$. The molding pressure was assigned in accordance with the design of the samples and was: $5.5 \pm 0.5\text{kgf/cm}^2$ for monolithic and $2.5 \pm 0.5\text{kgf/cm}^2$ for multilayer (honeycomb) samples.

As a result of the research, the following results were obtained:

a) the warpage of the sample occurs along the direction of unbalanced shrinkage of the binder-this is the direction in the plane of the material, perpendicular to the base;

b) the influence of the direction of stretching of the honeycomb honeycomb on the magnitude and direction of warpage for multilayer (honeycomb) samples was not revealed;

c) for a balanced laying of a monolithic structure, it must be compensated by symmetrical monolayers relative to the central monolayer (0/90/0;90/0/90;+45/90/-45/0/-45/90/+45) or symmetrical laying monolayers without a central layer (+45/90/-45/0/0/-45/90/+45), and the number of layers is not limited;

d) stacking monolayers, type 0/90;+(-)45/0;+(-)45/90;+45/-45 is not balanced and leads to warpage, moreover, the stacking of monolayers +45/-45 is the most unbalanced and leads to the maximum diagonal warpage;

e) a comparative analysis of the behavior of monolithic samples obtained from unidirectional prepreps on glass and carbon bases after thermal polymerization of the binder showed the identity of the direction of warpage, and the value of warpage of structures made of prepreps on a carbon base turned out to be 7-10% less;

f) equilibrium multilayer (honeycomb) structures were obtained with laying in two transitions: the first transition (+45/90/-45/0/PSP)-a strong screw was observed after the regime; the second transition (gluing layers 0/-45/90/+45 on the PSP and the general scheme of the sample +45/90/-45/0/PSP/0/-45/90/+45)-a perfectly flat sample was obtained, i.e. in multilayer samples, the symmetry of the relative honeycomb core as the central layer is required.

Изучение объемной структуры полимерных композитных материалов и процессов их разрушения методами ультразвуковой микроскопии

¹Петронюк Ю.С., ²Рыжова Т.Б., ¹Мороков Е.С., ¹Левин В.М.

¹ИБХФ РАН, г. Москва, Россия;

²ЦАГИ, г. Жуковский, Россия

Несмотря на растущий объем армированных полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиаконструкциях, ожидаемая эффективность их применения пока не достигнута. Это обусловлено гетерогенностью и анизотропией структуры ПКМ, а также особенностью процессов разрушения – многоочаговостью на микроуровне. Наилучшим методом для неразрушающей оценки повреждаемости микроструктуры ПКМ является ультразвуковая визуализация. Методы высокого разрешения, такие как акустическая микроскопия [1–4], позволяют изучать структуру композитов на микроуровне, оценивать не только технологические несовершенства, но также изучать механизмы формирования повреждений в процессе воздействия внешних факторов. В основе метода импульсной акустической микроскопии лежит взаимодействие фокусированного высокочастотного импульса (50–100 МГц) с элементами структуры (границами слоев и нитей, расслоениями и трещинами). В отражательном режиме эхо-сигналы различаются по времени задержки, что позволяет определять глубину залегания дефектов. Акустическое сканирование позволяет оценивать количество повреждений по всему объему композита с разрешением порядка 50 мкм на глубину до 3 мм; позволяет оценивать их природу (частичное или полное отслоение).

В докладе представлены результаты применения метода ультразвуковой микроскопии для визуализации технологических несовершенств/дефектов в образцах из ПКМ, выполненных по технологиям намотки и препрега на основе углеродных волокон и эпоксидной матрицы. Приведены акустические изображения деградации ПКМ при внешних воздействиях: растяжении, ударном повреждении, комплексном воздействии механического нагружения и климатических факторов.

1. Закутайлов К.В., и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. №8. С. 28.

2. Petronyuk Y S., et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1636. 012005.

3. Morokov E.S., et al // Composite Structures. 2021 V. 256 N 15. P. 113102.

4. Рыжова Т.Б., и др. // Вестник МАИ. 2020. Т. 27. №4. С. 92.

Study of the polymer composite bulk structure and its degradation utilizing ultrasound microscopy

¹Petronyuk Y.S., ²Ryzhova T.B, ¹Morokov E.S., ¹Levin V.M.

¹IBCP RAS, Moscow, Russia;

²TsAGI, Zhukovsky, Russia

Despite the growing the reinforced polymer composite materials (PCM) volume in aircraft structures the expected effectiveness of their use hasn't been achieved yet. It is caused by the high anisotropy and heterogeneity of the PCM structure as well as the specificity of multifocal destruction processes at micro level. The best method for non-destructive evaluation of the bulk microstructure of PCM and its damages is ultrasonic imaging. High-resolution methods, such as acoustic microscopy [1–4], make it possible to study the composites structure at micro level, which makes it possible to assess technological imperfections but the mechanisms of damage formation during the influence of external factors also. The method of pulsed acoustic microscopy is based on the interaction of a focused high-frequency pulse (50–100 MHz) with the structural elements – boundaries of layers and filaments, delaminations and cracks. In reflection mode the echo-signals differ in delay time that allows estimate the depth of imaging. Acoustic scanning offers estimation of the damaging over the volume of the composite with a resolution of about 50 mkm to a depth of 3 mm. It allows assessing the damaging nature – partial or total detachment.

The report presents the results of using the ultrasonic microscopy method to assess the quality of PCM samples made using winding and prepreg technologies based on carbon fibers and epoxy matrix. The results of visualization of technological defects as well as the processes of degradation of the material under impact, mechanical tension and bending, complex effects of mechanical loading and climatic factors are shown.

1. Zakutailov K.V., et al // Inorganic Materials. 2010. V. 46. No 15. P. 1655.
2. Petronyuk Y S., et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1636. 012005.
3. Morokov E.S., et al // Composite Structures. 2021 V. 256 No 15. P. 113102.
4. Ryzhova T.B., et al. // Bulletin of MAI. 2020. Vol. 27. No. 4. p. 92.

Быстро отверждаемое фталонитрильное связующее для изготовления термостойких композиционных материалов методом горячего прессования

Полякова Д.И., Морозов О.С., Булгаков Б.А.

ИНУМиТ, г. Москва, Россия

Преимуществом полимерных композиционных материалов (ПКМ) над металлами являются их высокие удельные механические характеристики. Одним из ограничений их использования является термостойкость, определяемая полимерной матрицей. Полимеры, полученные из фталонитрилов, известны как самые термостойкие ($T_g > 400^\circ\text{C}$, $T5\% > 500^\circ\text{C}$) среди термореактивных полимеров. Их использование для производства ПКМ требует длительного цикла отверждения до 30–40 часов, включая постотверждение при 300–375 $^\circ\text{C}$. Уже известные фталонитрилы подходят для ограниченного числа технологий производства композитов: метода инъекции в форму, метода вакуумной инфузии и метода формования из препрегов. Разработка матриц для быстрого производства термостойких ПКМ является актуальной проблемой. В данном исследовании были разработаны быстро отверждаемые препреги из углеродной ткани и стеклоткани с фталонитрильной матрицей для горячего прессования.

Из новолака реакцией с 4 нитрофталонитрилом был получен фталонитрильный олигомер (ФНН), выбранный в качестве объекта исследования из-за хорошей растворимости в низкокипящих растворителях. Это позволяет приготовить высококонцентрированный раствор для эффективной пропитки ткани. Были приготовлены смеси ФНН с различным массовым содержанием двух отвердителей: 4 аминофеноксифталонитрила (АФН) и 1,3-бис (3 аминофенокси) бензола (АФБ). Время отверждения смесей оценивали по времени гелеобразования при 240 $^\circ\text{C}$. Термическую стабильность смол определяли с помощью термогравиметрического анализа, оценивали $T5\%$. Для изготовления препрега были выбраны составы каждого отвердителя с наивысшим $T5\%$ (432 $^\circ\text{C}$) и наименьшим временем отверждения (6 мин). Далее были выбраны параметры прессования: температура, давление и время выдержки. В результате общее время формования ПКМ при 240 $^\circ\text{C}$ и 280 $^\circ\text{C}$ при давлении 2,1 МПа составило 53 минуты. Механические испытания углепластиков (УПКМ) и стеклопластиков (СПКМ) были проведены в соответствии с международными стандартами.

УПКМ с АФН: прочность на сжатие $269,6 \pm 18,6$ МПа; модуль сжатия $53,7 \pm 4,4$ ГПа, предел прочности при межслоевом сдвиге $19,8 \pm 1,0$ МПа.

УПКМ с АФБ: прочность на сжатие 290 ± 44 МПа; модуль сжатия $49,2 \pm 4,9$ ГПа, предел прочности при межслоевом сдвиге $26,0 \pm 1,0$ МПа.

СПКМ с АФН: прочность на сжатие $544,9 \pm 33,3$ МПа; модуль сжатия $33,8 \pm 3,2$ ГПа, предел прочности при межслоевом сдвиге $69,9 \pm 6,2$ МПа.

СПКМ с АФБ: прочность на сжатие $389,2 \pm 13,5$ МПа; модуль сжатия $28,0 \pm 2,2$ ГПа, предел прочности при межслоевом сдвиге $48,5 \pm 2,3$ МПа.

Fast curing heat resistant phthalonitrile blend for manufacture of fabric reinforced polymers by hot pressing method

Poliakova D.I., Morozov O.S., Bulgakov B.A.

INCMaT, Moscow, Russia

Fiber reinforced polymers (FRP) have high specific mechanical characteristics and developed to replace metal constructions. One of the limitations of FRP application is thermal stability, which is determined by the polymer matrix. Phthalonitrile-based polymers are known as the most heat resistant polymers ($T_g > 400^\circ\text{C}$, $T5\% > 500^\circ\text{C}$) among thermosets. However, the use of phthalonitrile resins for production of FRPs requires long curing cycle up to 30 hours including post-curing at 300–375 $^\circ\text{C}$. Thus, the existing phthalonitrile resins are suitable for limited composite production techniques and the development of matrices with a short curing cycle for rapid FRPs manufacturing

is demanded. In this study fast curing carbon and glass fiber/phthalonitrile prepregs for hot-pressing processing were developed.

Phthalonitrile oligomer (PNN) obtained by the reaction of novolac phenolic resin with 4 nitrophthalonitrile was chosen as an object of this study because of good solubility in low boiling organic solvents. This makes it possible to prepare a highly concentrated solution (>45 weight%) for effective fiber impregnation. Blends of PNN with different mass content of two curing agents 4 aminophenoxyphthalonitrile (APN) and 1,3-bis(3-aminophenoxy)benzene (APB) based on aromatic amine were prepared. Curing time of resins with different curing agents contents were estimated from the gelation time of the resin at 240°C. Thermal stability of resins was determined by thermal gravimetric analysis (TGA), the T5% (Ar) was estimated. The compositions with each curing agent with the highest T5% (432°C) and the least cure time (6 min) were selected for prepreg fabrication. Then pressing parameter were selected. As a result, total time of FRP curing at 240°C and postcuring at 280°C under 2.1 MPa was 53 minutes. The mechanical tests of the CFRPs and GFRPs were estimated in accordance with international standards.

CFRP with APN: compressive strength $269,6 \pm 18,6$ MPa; compressive modulus $53,7 \pm 4,4$ GPa, ILSS $19,8 \pm 1,0$ MPa.

CFRP with APB: compressive strength 290 ± 44 MPa; compressive modulus $49,2 \pm 4,9$ GPa; ILSS $26,0 \pm 1,0$ MPa.

GFRP with APN: compressive strength $544,9 \pm 33,3$ MPa; compressive modulus $33,8 \pm 3,2$ GPa, ILSS $69,9 \pm 6,2$ MPa.

GFRP with APB: compressive strength $389,2 \pm 13,5$ MPa; compressive modulus $28,0 \pm 2,2$ GPa; ILSS $48,5 \pm 2,3$ MPa.

Математическое моделирование теплового излучения при высокоскоростном обтекании космических аппаратов

Пронина П.Ф., Тушавина О.В., Егорова М.С.

МАИ, г. Москва, Россия

На основе экспериментальных данных по воздействию планет на поверхность космического аппарата строится математическая модель, учитывающая механические свойства полимерных композиционных материалов. Из этих материалов сделана носовая часть космического аппарата. При этом строятся аналитические решения теплогазодинамических характеристик в окрестности критической точки затупленного конуса летательного аппарата при гиперзвуковом обтекании. В окрестности критической точки между ударной волной и затуплением газодинамическое течение – несжимаемое, но с большими продольными составляющими градиента давления и скорости, превышающими сами давления и скорость.

На основе полученных численных результатов исследованы на тепловые потоки и температуры поверхности летательного аппарата влияние каталитичности материала поверхности, а также влияние на теплообмен излучения и теплопроводности тела в широком диапазоне чисел Маха набегающего потока и высот полета. Полученные решения с достаточной степенью точности описывают тепломассообмен носовой части космического аппарата, выполненной из полимерных композиционных материалов. Приводятся результаты расчетов.

1. Тепломассообмен в окрестности критической точки затупленного конуса при гиперзвуковом обтекании космических аппаратов. Рабинский Л.Н., Тушавина О.В. В книге: Космические системы. Москва, 2021. С. 51.

2. Тепломассообмен на боковых поверхностях затупленных конусов при гиперзвуковом обтекании космических аппаратов. Тушавина О.В., Формалев В.Ф. В книге: Космические системы. Москва, 2021. С. 56-57.

3. Особенности механизма термосилового разрушения углеродных материалов при обтекании сверхзвуковым высокотемпературным воздушным потоком Афанасьев В.А., Никитин П.В., Тушавина О.В.

Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 4. С. 572-577.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код проекта FSFF-2020-0016)

Mathematical simulation of thermal radiation at high-velocity flow around space vehicles

Pronina P.F., Tushavina O.V., Egorova M.S.

MAI, Moscow, Russia

On the basis of experimental data on the influence of planets on the surface of a spacecraft, a mathematical model is constructed that takes into account the mechanical properties of polymer composite materials. The nose of the spacecraft is made of these materials. In this case, analytical solutions are constructed for the thermal and gas-dynamic characteristics in the vicinity of the critical point of a blunt cone of an aircraft in hypersonic flow. In the vicinity of the critical point between the shock wave and bluntness, the gas-dynamic flow is incompressible, but with large longitudinal components of the pressure gradient and velocity exceeding the pressure and velocity themselves.

On the basis of the obtained numerical results, the influence of the catalyticity of the surface material, as well as the influence of the study and thermal conductivity of the body on heat fluxes and temperatures of the aircraft surface, have been investigated in a wide range of freestream Mach numbers and flight altitudes. The obtained solutions describe with a sufficient degree of accuracy the heat and mass transfer of the spacecraft nose, made of polymer composite materials. The calculation results are presented.

1. Heat and mass exchange in the neighborhood of a critical point of a blunted cone in hypersonic flow around space vehicles. Rabinsky L.N., Tushavina O.V. In the book: Space systems. Moscow, 2021, p. 51.

2. Heat and mass exchange on the lateral surfaces of blunted cones in hypersonic flow of space vehicles Tushavina O.V., Formalev V.F. In the book: Space systems. Moscow, 2021.S. 56-57.

3. Specific features of the mechanism of thermal force destruction of carbon materials under supersonic high-temperature air flow. Afanasyev V.A., Nikitin P.V., Tushavina O.V.

Thermal physics of high temperatures. 2019.Vol. 57.No. 4.P. 572-577.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project code FSFF-2020-0016).

Олигомерные фторсодержащие фталонитрилы в качестве компонентов термореактивных смол с улучшенной технологичностью для высокотемпературных ПКМ

¹Терехов В.Е., ²Булгаков Б.А., ²Кепман А.В., ²Бабкин А.В.

¹МГУ, ²ИНУМиТ, г. Москва, Россия

Полимерные матрицы на основе фталонитрилов (ФН) для полимерных композиционных материалов (ПКМ) являются самыми термостойкими ($T_{ст} > 400^{\circ}\text{C}$, $T_{5\%} > 500^{\circ}\text{C}$) среди известных, при этом они не горят, а в процессе полимеризации не выделяются низкомолекулярные соединения. Поэтому ПКМ на основе ФН являются перспективными материалами для высокотемпературных применений в авиационно-космической промышленности.

Однако, существует несколько проблем, ограничивающих использование подобных материалов: в окислительной атмосфере при 300°C они начинают окисляться, быстро теряя свои эксплуатационные характеристики; для использования экономически-выгодных инъекционных методов формования ПКМ смола должна обладать широким технологическим окном. Именно на решение данных проблем нацелена представленная работа: улучшение термоокислительной стабильности ФН полимерной матрицы; создание низкоплавких ФН мономеров.

Известно, что фторированные органические соединения менее подвержены окислению, чем их водородосодержащие аналоги. При этом наличие аморфной структуры предполагает низкие температуры стеклования полимеризуемого соединения. Таким образом, целью данной работы было получение полимерной матрицы на основе фторсодержащих олигомерных фталонитрилов и изучение её свойств.

На первом этапе работы была получена серия изомерных фторсодержащих олигомерных ФН, среди которых один из олигомеров имеет аморфную структуру с $T_{ст} = 51^{\circ}\text{C}$, что позволяет расширить технологическое окно ФН смол. Несмотря на кристаллическую структуру с высокой температурой плавления других олигомеров, все соединения были полимеризованы с помощью основных типов отвердителей ФН смол: ароматические амины,

соли металлов, фенолы, органические кислоты, а также проведен подбор оптимального режима отверждения. Полученные смолы исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии, полученные полимеры методом термогравиметрического анализа.

В результате были получены ФН полимеры, не уступающие известным в термоокислительной стабильности, при этом удалось улучшить технологичность ФН смол.

Работа выполнена в рамках государственного задания Химического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (номер соглашения АААА-А21-121011590086-0). Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Oligomeric fluorine-containing phthalonitriles as components of thermosetting resins with improved processability for high-temperature PCM

¹Terekhov V.E., ²Bulgakov B.A., ²Kepman A.V., ²Babkin A.V.

¹MSU, ²INCMaT, Moscow, Russia

Polymer matrices based on phthalonitriles (PN) for polymer composite materials (PCM) are the most heat-resistant ($T_g > 400^\circ\text{C}$, $T_5 > 500^\circ\text{C}$) among the known ones, while they do not burn, and low-molecular compounds do not release during polymerization. Therefore, PCM based on PN are promising materials for high-temperature applications in the aerospace industry.

However, there are several problems limiting the use of such materials: in an oxidizing atmosphere at 300°C , they begin to oxidize, rapidly losing their performance characteristics; for the use of cost-effective injection molding methods resin must have a wide technological window. The presented work is aimed at solving these problems: improving the thermo-oxidative stability of the PN polymer matrix; creation of low-melting PN monomers.

It is known that fluorinated organic compounds are less susceptible to oxidation than their hydrogen-containing analogs. In this case, the presence of an amorphous structure suggests low glass transition temperatures of the polymerizable compound. Thus, the purpose of this work was to obtain a polymer matrix based on fluorine-containing oligomeric phthalonitriles and to study its properties.

At the first stage of the work, a series of isomeric fluorine-containing oligomeric PNs was obtained, among which one of the oligomers has an amorphous structure with $T_g = 51^\circ\text{C}$, which makes it possible to expand the technological window of PN resins. Despite the crystalline structure with a high melting point of other oligomers, all compounds were polymerized using the main types of PN resin curing agents: aromatic amines, metal salts, phenols, organic acids, and an optimal curing mode was selected. The resulting resins were investigated by differential scanning calorimetry, the obtained polymers by thermogravimetric analysis.

As a result, PN polymers were obtained, which thermal-oxidative stability is not inferior to the known ones. At the same time, the processability of the PN resin was improved.

This work was conducted in the framework of the state assignment of the Chemistry Department of Moscow State University (Agreement No. АААА-А21-121011590086-0). This research was performed according to the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow State University "The future of the planet and global environmental change."

Моделирование смятия композиционного материала методами вычислительной микромеханики

Турбин Н.В., Трифонов Р.Д., Ковтунов С.С.
МАИ, г. Москва, Россия

В работе рассмотрен метод получения модуля смятия однонаправленного композиционного материала методами вычислительной микромеханики. Определение упругих свойств в условиях работы на смятие не относится к задачам типовых испытаний программы общей квалификации однонаправленного материала. Вместе с тем, известный модуль упругости на смятие однонаправленного материала может быть эффективно использован при послойном моделировании композитных конструкций на уровне элементарных и конструктивно-подобных образцов. Учет анизотропии рассматриваемого свойства производится путем моделирования испытаний образцов с различными ориентациями волокон в рамках предлагаемого расчетного метода. В данном исследовании образец с микроструктурой

моделируется в конечных элементах, поддерживающих плоское деформированное состояние. Рассматриваются практические особенности реализации в подобной формулировке. Модель имитирует результаты испытаний на полу-образце с отверстием диаметром 6 мм. Полученные результаты сравниваются с рассчитанным модулем сжатия, полученным в результате виртуальных испытаний однонаправленного материала. Дается оценка влияния различных параметров модели, таких как размеры образца, наличие трения и учет нелинейности. Наиболее значимые параметры определяются на основе качественного сравнения с результатами лабораторных испытаний из литературы. Полученные свойства по смятию возможно использовать для уточнения моделей виртуальных испытаний на прочность образцов композиционного материала с установленными крепежными элементами в рамках пирамиды расчетно-экспериментальных образцов.

Bearing response simulation in composite materials via computational micromechanics

Turbin N.V., Trifonov R.D., Kovtunov S.S.

MAI, Moscow, Russia

In this work the technique for obtaining the bearing moduli of unidirectional composite material by means of computational micromechanics is proposed. Determination of the material's elastic properties under bearing load conditions is typically not included in the general characterization testing program for unidirectional composite. Still, given bearing elastic moduli of the unit layer could be efficiently utilized in ply-by-ply modeling of composite structures on the coupon and elements specimen levels of testing pyramid. The anisotropy of considered material property might be taken into account directly by performing off-angle virtual tests in the frame of proposed methodology. This study investigates the desired material elastic property by using micro-structured material sample, which is discretized by plain strain finite elements. Necessary practical considerations for such implementation are following. The model simulates the results of half-specimen bearing test with 6 mm diameter hole. Received values are compared with the results of compression test simulation of unidirectional composite material. The influence of sample size, friction and non-linear effects is estimated. The most critical parameters are assigned based on comparison with laboratory material testing results from literature. Obtained values of bearing moduli might be used for refinement of the simulation of composite materials and structures testing as a complement to building-block approach strategy.

Анализ трещиностойкости клеевых соединений с использованием модели когезионной зоны в методе конечных элементов

Устинов А.А.

МАИ, г. Москва, Россия

Клеевые соединения, в отличие от механических, обеспечивают существенный выигрыш в весе и герметичности конструкций, что обуславливает их широкое применение. Поэтому всё более актуальной становится разработка методов эффективной оценки и прогнозирования несущей способности и долговечности конструктивных клеевых соединений при заданной их геометрии и моде нагружения, конфигурации и размерах дефекта. Наилучшие возможности для этого обеспечивает использование аналитических и экспериментальных методов линейной упругой механики разрушения, в рамках которой разработаны и активно применяются численные методы моделирования инициирования и роста трещин, основывающиеся на имплантации в метод конечных элементов модели когезионной зоны.

Модель когезионной зоны базируется на микромеханическом анализе предразрушения материала вблизи кончика трещины или любом месте концентрации напряжения, называемом процессной или когезионной зоной. Современные программные пакеты ANSYS® и ABAQUS® позволяют создавать такие модели применительно к инициированию и росту трещин в конструктивных клеевых соединениях, в том числе геометрически сложной конфигурации.

В работе предлагается оригинальная 3D модель критического роста трещины в конструкционном клеевом соединении, разработанная в рамках применимости линейной упругой механики разрушения и основанная на имплантации в метод конечных элементов модели когезионной зоны в программном комплексе ANSYS. Данная модель при

использовании экспоненциального закона когезионной зоны и экспериментально определённых его параметров позволяет выбирать оптимальное количество интерфейсных элементов и рассчитывать нагрузку начала расслоения и параметр трещиностойкости клеевого соединения с достаточной точностью и при минимальном объеме вычислений.

Оценка работоспособности модели проводилась на примере клеевых соединений на основе пластин алюминиевого сплава и трех типов конструкционных эпоксидных клеев марок ВК-9, ЭПК-1 и К-300, активно используемых при создании авиационной и ракетно-космической техники.

Crack resistance analysis of adhesive joints using the cohesive zone model in the finite element method

Ustinov A. A.

MAI, Moscow, Russia

Adhesive joints, unlike mechanical ones, provide a significant reduction in weight and tightness of structures, which causes their widespread use. Therefore, the development of methods for the effective evaluation and prediction of the bearing capacity and durability of structural adhesive joints with a given geometry and loading mode, configuration and size of the defect is becoming increasingly relevant. The best opportunities for this are provided by the use of analytical and experimental methods of linear elastic fracture mechanics, within the framework of which numerical methods for modeling crack initiation and growth based on implantation of a cohesive zone model into the finite element method have been developed and actively applied.

The cohesive zone model is based on a micromechanical analysis of the pre-fracture of the material near the tip of the crack or any place of stress concentration, called the process or cohesive zone (CZ). Modern software packages ANSYS ® and ABAQUS ® allow you to create such models in relation to the initiation and growth of cracks in structural adhesive joints, including geometrically complex configurations.

The paper proposes an original 3D model of critical crack growth in a structural adhesive joint, developed within the applicability of linear elastic fracture mechanics and based on implantation of a cohesive zone model in the ANSYS software package into the finite element method. This model, using the exponential law of the cohesive zone and its experimentally determined parameters, allows you to choose the optimal number of interface elements and calculate the load of the beginning of delamination and the crack resistance parameter of the adhesive joint with sufficient accuracy and with minimal amount of calculations.

The performance of the model was evaluated using specimens of adhesive joints based on aluminum alloy plates and three types of structural epoxy adhesives of VK-9, EPK-1 and K-300 brands, which are actively used in the creation of aviation and rocket and space technology.

Разработка методики верификации свойств полимерных волокнистых композиционных материалов для проектирования новых материалов на основе информации из баз данных

¹Ходанович Н.В., ²Бухаров С.В., ¹Лебедев А.К.

¹АО «НИИГрафит», ²МАИ, г. Москва, Россия

В работе рассмотрена методика, позволяющая делать выводы на основе анализа массивов данных о результатах испытаний термопластичных композиционных материалов на примере следующих составов: углепластик на основе полифениленсульфида и стеклопластик на основе полисульфона. Методика построена на результатах верификации расчётных методов моделирования, используемых для прогнозирования физико-механических характеристик изделий из полимерных волокнистых композиционных материалов. Проведён литературный обзор свойств материалов выбранных составов и проведена классификация зависимости свойств материалов от армирующей системы и методов переработки.

На основе результатов анализа разработана методика апробации материалов, позволяющая определить уровень свойств испытываемой опытной партии образцов материала относительно известного уровня. Установлено, что необходимо корректно обучить нейросеть, основываясь на обработанных вручную данных не только из открытых источников, но и на основе данных экспериментов, в которых должны варьироваться следующие параметры:

схема укладки, тип армирования и процент армирующего наполнителя для каждого сочетания материалов. Также необходимо определить референсные диапазоны значений свойств для каждого из типов материалов. На основе этих данных можно определить работоспособность и корректность разрабатываемой методики и определить целесообразность дальнейших работ в исследуемой области.

1. Alaloul W.S. Data Processing Using Artificial Networks [Текст] / W.S. Alaloul, A.H. Qureshi // Dynamic Data Assimilation – Beating the Uncertainties. – 2020.

2. Куприк А.И. Анализ алгоритма автоматической классификации документов, основанного на применении искусственных нейронных сетей / А.И. Куприк, М.А. Старков // Информационные технологии и автоматизация управления: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, работников образования и промышленности, Омск, 15–16 мая 2019 года / Ответственный редактор А.В. Никонов. – Омск: Омский государственный технический университет, 2019. – С. 172-180.

3. Stoeffler K. Polyphenylene sulfide (PPS) composites reinforced with recycled carbon fiber [Текст] / K. Stoeffler, S. Andjelic, N. Legros, J. Roberge, S. B. Schougaard // Composite Science and Technology. – 2013. - №84. – с. 65-71.

4. Электронный каталог EnsingerPlastics [Электронный ресурс]: база данных материалов. – Режим доступа: <https://www.ensingerplastics.com/>, свободный – Загл. с экрана.

5. Ning, Fuda & Cong, W.L. & Qiu, Jenny & Wei, Junhua & Wang, Shiren. (2015). Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites using Fused Deposition Modeling. Composites Part B: Engineering. 80. 10.1016/j.compositesb.2015.06.013.

6. Электронный каталог MakeItFrom [Электронный ресурс]: база данных материалов. — Режим доступа: <https://www.makeitfrom.com/>, свободный — Загл. с экрана.

7. Электронный каталог Ticona [Электронный ресурс]: база данных материалов. — Режим доступа: <https://www.celanese.com>, свободный — Загл. с экрана.

8. Сорокин А.Е. Технологии получения полимерных композиционных материалов на основе термопластичной матрицы (обзор) [Текст] / А.Е. Сорокин, В.А. Сагомонова, А.П. Петрова, Л.В. Соловьянчик // Труды ВИАМ. – 2021. – №3. – с. 78-86.

9. Композиционный полимерный антифрикционный материал на основе полифениленсульфида [Текст]: пат. 2616028 Рос. Федерация: МПК B82Y 30/00.

Development of a methodology of properties verification of fiber polymer composites for new materials design based on databases information

¹Khodanovich N.V., ²Bukharov S.V., ¹Lebedev A.K.

¹NIIGRAFIT, ²MAI, Moscow, Russia

The paper considers a technique that allows drawing conclusions based on the analysis of data sets on the test results of thermoplastic composite materials using the example of the following compositions: carbon fiber-reinforced plastic based on polyphenylene sulfide and fiberglass-reinforced plastic based on polysulfone. The technique is based on the results of verification of computational modeling methods used to predict the physical and mechanical characteristics of products from polymer fiber composite materials. A literature review of the properties of materials of the selected compositions is carried out and a classification of the dependence of the properties of materials on the reinforcing system and processing methods is carried out. Based on the results of the analysis, a method for testing materials has been developed, which makes it possible to determine the level of properties of the tested pilot batch of material samples relative to a known level. It was found that it is necessary to correctly train the neural network, based on manually processed data not only from open sources, but also on the basis of experimental data, in which the following parameters should vary: the layout scheme, the type of reinforcement and the percentage of reinforcing filler for each combination of materials. It is also necessary to define reference ranges for property values for each type of material. Based on these data, it is possible to determine the operability and correctness of the developed methodology and determine the feasibility of further work in this area.

Исследование влияния способа подготовки поверхности титанового сплава для наиболее эффективного его последующего адгезионного соединения со стеклокомпозитом

¹Червяков А.А., ²Кобзев М.С., ¹Насонов Ф.А.

¹МАИ, ²АО «Компания «Сухой», г. Москва, Россия

Для облегчения элементов конструкций летательных аппаратов, работающих в специфических условиях кратковременного воздействия на них термозероизонного потока, представляется эффективным применять гибридные слоистые материалы, состоящие из последовательно чередующихся склеенных между собой слоёв листового металла и волокнистого полимерного композиционного материала (ПКМ) в разных соотношениях. Примером такого гибридного металл-полимерного композита (МПК) является титан-стеклокомпозит, состоящий из тонкой титановой фольги VT23 и стеклокомпозита ВПС-32К64 на основе клеевого препрега КМКС-4м.175.Т64.55. Наружные и внутренние титановые слои, благодаря близкому ТКЛР к значениям такового для стеклокомпозитов, позволяют обеспечивать невысокий уровень остаточных напряжений, а также обеспечить функцию термозащиты МПК, благодаря чередованию со стеклокомпозитом, имеющим низкую теплопроводность.

Работоспособность МПК существенным образом определяется адгезионной связью между металлом и ПКМ, её устойчивостью и прочностью. Клеевые препреги имеют высокие адгезионные характеристики к титану. Одним из вариантов повышения прочности межслоевой адгезии является также подготовка поверхности титанового слоя.

С целью изучения оптимальной адгезионной связи и наилучшей устойчивости соединения в условиях эксплуатации, прессованием изготовлены трёхслойные образцы, представляющие собой две полосы титанового сплава (толщиной 2 мм), склеенные между собой внахлест через слой стеклокомпозита (за счёт адгезии клеевого связующего к титану), без и с применением различных способов подготовки поверхности титанового сплава: обработка наждачной бумагой (зашкуривание), пескоструйная обработка, зашкуривание с травлением смесью плавиковой и азотной кислот, зашкуривание с нанесением клеевого подслоя ВК-25 (в том числе с добавлением в ВК-25 углеродных наночастиц (0,3 и 0,6 масс.%). Во всех случаях поверхность титановых полос предварительно обезжиривали бензином и ацетоном. Испытания образцов проводили по ГОСТ 14759-69 «Клеи. Метод определения прочности при сдвиге».

Наиболее эффективными методами подготовки поверхности оказались применение клеевого подслоя с использованием наночастиц (0,3 и 0,6 масс.%) и пескоструйная обработка (однако, для тонких фольг метод затруднителен). Среднее значение прочности при сдвиге (τ_c) для таких образцов увеличилось на 73,54%, 77,11%, 68,68%, соответственно, по сравнению со средним значением $\tau_c = 14,59$ МПа образцов без обработки.

Research of the influence of the method of surface preparation of titanium alloy for the most effective subsequent adhesive bonding with glass-fiber-reinforced plastic

¹Chervyakov A.A., ²Kobzev M.S., ¹Nasonov F.A.

¹MAI, ²Sukhoi Company, Moscow, Russia

To facilitate the elements of aircraft structures operating under specific conditions of short-term exposure to a temperature erosion flow it seems effective to use hybrid layered materials consisting of successively alternating layers of sheet metal and fiber polymer composite material (PCM) bonding together in different proportions. An example of such a hybrid metal-polymer composite (MPC) is a titanium-glass-fiber-reinforced plastic consisting of a thin titanium foil VT23 and a glass-fiber-reinforced plastic VPS-32K64 based on an adhesive prepreg KMKS-4m.175.T64.55. Outer and inner titanium layers due to the close of linear thermal expansion coefficient to those for glass-fiber-reinforced plastic make it possible to ensure a low level of residual stresses as well as to provide the function of thermal protection of the MPC due to alternation with glass-fiber-reinforced plastic having a low thermal conductivity.

The adhesive bond between the metal and the PCM, its stability and strength, essentially determines the efficiency of the MPC. Adhesive prepregs have high adhesion characteristics to

titanium. One of the options for increasing the strength of interlayer adhesion is also the preparation of the surface of the titanium layer.

In order to study optimal adhesive bonding and the best stability of the joint under operating conditions three-layer samples were made by pressing which are two strips of titanium alloy (2 mm thick) bonding together through a layer of glass composite (due to the adhesion of the adhesive binder to titanium) without and using various methods of preparing the surface of titanium alloy: sandpaper treatment (sandblasting), sandblasting with etching with a mixture of hydrofluoric and nitric acids, sanding with the application of a primer VK-25 (including the addition of carbon nanoparticles (0.3 and 0.6 wt.%) to VK-25). In all cases, the surface of the titanium strips was previously degreased with gasoline and acetone. The samples were tested according to GOST 14759-69 "Adhesives. Method for determining shear strength".

The most effective methods of surface preparation were the use of a primer using nanoparticles (0.3 and 0.6 wt.%) and sandblasting (however, the method is difficult for thin foils). The average value of shear strength (τ_s) for such samples increased by 73.54%, 77.11%, 68.68%, respectively, compared with the average value of $\tau_s = 14.59$ MPa of samples without treatment.

Экспериментальное определение локальной прочности при сдвиге слоистых полимерных композиционных материалов для оптимизации численной оценки их трещиностойкости методом когезионной зоны при нагружении по моде II

Шаталин А.А., Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В.

МАИ, г. Москва, Россия

Экспериментальная оценка межслоевой локальной прочности слоистых полимерных композиционных материалов при отрыве позволила оптимизировать модель когезионной зоны и получать результаты численных расчетов параметров их трещиностойкости при нагружении по моде I с достаточной точностью при минимальном объеме вычислений [1]. Целью данной работы является разработка аналогичной методики при сдвиге для использования получаемых результатов в численной оценке трещиностойкости ПКМ методом когезионной зоны при нагружении по моде II.

Для экспериментального определения прочности при сдвиге в малой локальной зоне когезионного контакта нами предложена авторская методика, базирующаяся на методике Тарнопольского Ю.М. и Кинциса Т.Я. [2]. Образец, предназначенный для испытаний, представляет собой прямоугольную полосу из слоистого ПКМ шириной 20-25 мм, длиной 150-200 мм и толщиной от 2-5 мм. В средней части образца между слоями в горизонтальной плоскости, прокладывается фторопластовая плёнки толщиной 10 мкм и длиной 15-20 мм по всей ширине образца с круглым отверстием заданного диаметра (3-10 мм) в геометрическом центре плёнки. При формовании образца между слоями образуется зона локального когезионного контакта. В отформованном образце на глубине залегания плёнки наносится с помощью алмазного круга по одному надрезу на нижней и верхней поверхностях образца в вертикальной плоскости, так чтобы сдвигалась только контактная зона. Следует заметить, что на результаты испытаний образцов сильно влияет глубина нанесения надрезов. Не доведение надреза до плёнки приводит к повышению замеренной прочности txz .

Подготовленный для испытаний образец устанавливается по меткам в зажимы испытательной машины таким образом, чтобы продольная ось образца совпадала с осью приложения нагрузки и осью зажимных губок. Испытания образцов проводятся при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, с постепенным наращиванием нагрузки до разрушения образца. Скорость движения зажима машины 1 мм/мин. Фиксируется наибольшая нагрузка и перемещение захватов разрывной машины, достигнутые при испытании. Методика отработывалась на эпоксиглаз- и эпоксиглазкомпозициях. Экспериментально определённые значения локальной прочности при сдвиге для диаметра контактной зоны 3 мм составили $17,3 \pm 0,5$ МПа и $22,8 \pm 0,2$ МПа, соответственно.

Полученные значения локальной прочности и деформации при сдвиге, позволяют повысить точность прогнозирования закономерности изменения нагрузки на краях трещины при численном анализе трещиностойкости ПКМ.

Литература:

1. Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В., Новиков Г.В. Использование экспериментально определенных параметров когезионной зоны при численной оценке устойчивости к расслоению полимерных композитов - «Перспективные материалы», 2019, №3. с. 74-81.

2. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков - 3-е изд., перераб. И доп. - М: Химия, 1981. - 272 с., ил.

Experimental determination of local shear strength of layered polymer composite materials to optimize the numerical evaluation of their crack resistance by the cohesive zone method under mode II loading

Shatalin A.A., Babaevsky P.G., Salienko N.V.

MAI, Moscow, Russia

The experimental evaluation of the interlayer local strength of layered polymer composite materials during separation made it possible to optimize the cohesive zone model and obtain the results of numerical calculations of their crack resistance parameters under mode I loading with sufficient accuracy with a minimum amount of calculations [1]. The purpose of this work is to develop a similar shear technique for using the results obtained in the numerical evaluation of the crack resistance of the PCM by the cohesive zone method under mode II loading.

For experimental determination of shear strength in a small local cohesive contact zone, we have proposed an author's method based on the method of Tarnopolsky Yu.M. and Kintzis T.Ya. [2]. The sample intended for testing is a rectangular strip of laminated PCM with a width of 20-25 mm, a length of 150-200 mm and a thickness of 2-5 mm. In the middle part of the sample between the layers in the horizontal plane, a fluoroplastic film with a thickness of 10 microns and a length of 15-20 mm is laid across the entire width of the sample with a round hole of a given diameter (3-10 mm) in the geometric center of the film. When forming the sample, a zone of local cohesive contact is formed between the layers. In the molded sample, at the depth of the film, one incision is applied using a diamond circle on the lower and upper surfaces of the sample in a vertical plane, so that only the contact zone is shifted. It should be noted that the test results of the samples are strongly influenced by the depth of the incisions. Not bringing the incision to the film leads to an increase in the measured strength τ_{xz} .

The sample prepared for testing is installed according to the marks in the clamps of the testing machine so that the longitudinal axis of the sample coincides with the axis of application of the load and the axis of the clamping jaws. The samples are tested at a temperature of $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, with a gradual increase in the load until the sample is destroyed. The movement speed of the machine clamp is 1 mm/min. The greatest load and movement of the grippers of the breaking machine achieved during the test are recorded. The technique was worked out on epoxysteclo- and epoxygulecomposites. Experimentally determined values of local shear strength for the diameter of the contact zone of 3 mm were 17.3 ± 0.5 MPa and 22.8 ± 0.2 MPa, respectively.

The obtained values of local strength and shear deformation make it possible to increase the accuracy of predicting the patterns of load changes at the edges of the crack in the numerical analysis of the crack resistance of the PCM.

References:

1. Babaev P.G., Salience N.In., Novikov G.V. the Use of experimentally determined parameters of the cohesive zone in the numerical evaluation of resistance to delamination of polymer composites "advanced materials", 2019, №3. S. 74-81.

2. Tarnopolsky J.M., T.Y. Cincis Methods of static tests of reinforced plastics - 3-e Izd., Rev. And add. - M: Chemistry, 1981. - 272 p., il.

Алфавитный указатель

Index

A

Afanasyeva E.S. 36
Agafonov I.I. 68
Akhmetshin L.R. 65
Aleksanova A.A. 63
Aleshkevich V.V. 36
Avdeev V.V. 36

B

Babaevsky P.G. 95
Babaytsev A.V. 62
Babkin A.V. 89
Bakulin V.N. 66
Barabanova O.A. 67
Bezmelnitsyn A.V. 73
Bezrukov G.T. 43
Bolshikh A.A. 11, 14, 76
Borovkov D.K. 11, 68
Bratusenko A.A. 34
Bukharov S.V. 39, 70, 92
Bulgakov B.A. 36, 46, 63, 87, 89
Burdin D.V. 69, 72
Buslaeva O.S. 59

C

Chernykh V.D. 66
Chervyakov A.A. 54, 94
Chukov N.A. 60

D

Deberdeev T.R. 74
Dedova D.V. 30
Dmitriev A.Ya. 78
Dudchenko A.A. 19

E

Egorova M.S. 88
Eremín V.P. 76
Evstratov S.V. 31

F

Forental G.A. 59

G

Gaidar A.I. 49
Galkin E.V. 38
Galkin V.I. 38
Gavva L.M. 13, 20
Ghile A.V. 39
Gorbakov N.V. 40
Grokh J.A. 15
Guseinov K.A. 73
Gusev D.E. 72
Guseva E.E. 76

I

Ignatyev S.D. 79
Iroshnikov A.I. 43
Ivanchenko A.V. 42

K

Kaikov K.V. 21
Kepman A.V. 46, 89
Khamidulova Z.S. 58
Khodanovich N.V. 92
Khomchenko A.V. 30
Kishov E.A. 25
Klesareva M.V. 14
Kobzev M.S. 94
Koniushok V.V. 45
Kovtunov S.S. 15, 90
Kudryavtsev O.A. 73, 81
Kuprikov M.Yu. 52
Kurkin E.I. 25, 29
Kyaw Y.K. 31

L

Lapshinov B.A. 49
Larin A.A. 80
Lebedev A.K. 39, 92
Leshkov E.V. 28, 81
Levin V.M. 85
Lobanova M.S. 46
Lupachev D.K. 16

M

Malakhov A.V. 47
Malakhov Andrei 47

Malysheva D.P. 53, 82
Mamontov A.V. 49
Markin O.V. 18
Martirosov M.I. 30
Maskaykina A.A. 19
Matveev E.V. 49
Medvedsky A.L. 30
Mitrofanov O.V. 20, 21, 23, 24
Morokov E.S. 85
Morozov O.S. 42, 87
Murokh A.F. 58

N

Nabatchikov S.V. 67
Nasonov F.A. 45, 56, 62, 94
Nazarov E.V. 14
Nechausov S.S. 42, 63
Nekravtsev E.N. 84

O

Ogurtsov P.S. 84
Olivenko N.A. 28, 81
Osman Mazen 20, 21, 24

P

Paltievich A.R. 38
Pavlov A.A. 25
Pavlov A.V. 67
Pavlova S.A. 25
Petronyuk Y.S. 85
Petrov V.O. 50
Petrov V.V. 53
Poliakova D.I. 87
Ponyaev L.P. 52
Pronina P.F. 88
Protsenko A.E. 53, 82

R

Rabinskiy L.N. 31
Reznichenko V.I. 40
Romashova M.O. 27
Ryzhova T.B. 85

С

Safonov K.S. 84
 Salienko N.V. 54, 95
 Sapozhnikov S.B. 28, 59, 73
 Seroshtanov V.V. 67
 Shatalin A.A. 95
 Shelkov K.A. 33
 Sheryshev A.E. 57
 Shipunov G.S. 34
 Shirshin K.V. 58
 Smirnov A.A. 50
 Smirnova E.A. 69
 Solyaev Y.O. 31, 33, 62
 Spirina M.O. 29
 Statnik E.S. 79
 Stepashkin A.A. 79
 Suvorinov A.V. 49
 Syomkin V.N. 43

Т

Terekhov V.E. 89
 Trifonov R.D. 90
 Trubnikov P.M. 56
 Trunova E.A. 57
 Turbin N.V. 15, 16, 68, 90
 Tushavina O.V. 88

У

Urmantsev S.Sh. 57
 Ustinov A.A. 91
 Ustinov B.E. 11, 14
 Ustyuzhanceva N.A. 58
 Utiabaeva A.R. 15

В

Vasina L.N. 43
 Vetokhin I.S. 70
 Vinogradov R.E. 69, 72

З

Zagidullin R.S. 78
 Zhikharev M.V. 28, 77

А

Авдеев В.В. 36
 Агафонов И.И. 67
 Алексанова А.А. 63
 Алешкевич В.В. 36
 Афанасьева Е.С. 36
 Ахметшин Л.Р. 64

Б

Бабаевский П.Г. 94
 Бабайцев А.В. 62
 Бабкин А.В. 88
 Бакулин В.Н. 65
 Барабанова О.А. 66
 Безмельницын А.В. 72
 Безруков Г.Т. 42
 Больших А.А. 11, 13, 75
 Боровков Д.К. 11, 67
 Братусенко А.А. 33
 Булгаков Б.А. 36, 45, 63, 86, 88
 Бурдин Д.В. 68, 71
 Буслаева О.С. 58
 Бухаров С.В. 38, 70, 92

В

Васина Л.Н. 42
 Ветохин И.С. 70
 Виноградов Р.Е. 68, 71

Г

Гавва Л.М. 12, 19
 Гайдар А.И. 48
 Галкин В.И. 37
 Галкин Е.В. 37
 Гиль А.В. 38
 Горбачев Н.В. 39
 Грох Ю.А. 15
 Гусев Д.Е. 71
 Гусев Е.Л. 65
 Гусева Е.Е. 75
 Гусейнов К.А. 72

Д

Дебердеев Т.Р. 74
 Дедова Д.В. 29
 Дмитриев А.Я. 77
 Дудченко А.А. 18

Е

Евстратов С.В. 31
 Егорова М.С. 87
 Еремин В.П. 75

Ж

Жихарев М.В. 27, 76

З

Загидуллин Р.С. 77

И

Иванченко А.В. 41
 Игнатьев С.Д. 78
 Ирошников А.И. 42

К

Кайков К.В. 21
 Кепман А.В. 45, 88
 Кишов Е.А. 25
 Клесарева М.В. 13
 Кобзев М.С. 93
 Ковтунов С.С. 15, 90
 Коношук В.В. 44
 Кудрявцев О.А. 72, 81
 Куприков М.Ю. 51
 Куркин Е.И. 25, 28

Л

Лапшинов Б.А. 48
 Ларин А.А. 80
 Лебедев А.К. 38, 92
 Левин В.М. 85
 Лешков Е.В. 27, 81
 Лобанова М.С. 45
 Лупачев Д.К. 16

М

Малахов А.В. 46
 Малышева Д.П. 52, 82
 Мамонтов А.В. 48
 Маркин О.В. 17
 Мартиросов М.И. 29
 Маскайкина А.А. 18
 Матвеев Е.В. 48
 Медведский А.Л. 29
 Митрофанов О.В. 19, 21, 22, 23
 Морозов О.С. 41, 86
 Мороков Е.С. 85
 Мурых А.Ф. 57

Н

Набатчиков С.В. 66
 Назаров Е.В. 13
 Насонов Ф.А. 44, 55, 62, 93
 Некравцев Е.Н. 83
 Нечаусов С.С. 41, 63

О

Огурцов П.С. 83
 Оливерко Н.А. 27, 81
 Осман Мазен 19, 21, 23

П

Павлов А.В. 66
Павлова С.А. 25
Палтиевич А.Р. 37
Петров В.В. 52
Петров В.О. 49
Петронюк Ю.С. 85
Полякова Д.И. 86
Поняев Л.П. 51
Пронина П.Ф. 87
Проценко А.Е. 52, 82

Р

Рабинский Л.Н. 31
Резниченко В.И. 39
Ромашова М.О. 26
Рыжова Т.Б. 85

С

Салиенко Н.В. 53, 94
Сапожников С.Б. 27, 58, 72
Сафонов К.С. 83

Сёмкин В.Н. 42
Сероштанов В.В. 66
Смирнов А.А. 49
Смирнова Е.А. 68
Соляев Ю.О. 31, 32, 62
Спирина М.О. 28
Статник Е.С. 78
Степашкин А.А. 78
Суворинов А.В. 48

Т

Терехов В.Е. 88
Трифонов Р.Д. 90
Трубников П.М. 55
Трунова Е.А. 56
Турбин Н.В. 15, 16, 67, 90

Тушавина О.В. 87

У

Урманцев С.Ш. 56
Устинов А.А. 90
Устинов Б.Е. 11, 13
Устюжанцева Н.А. 57

Утябаева А.Р. 15

Ф

Форенталь Г.А. 58

Х

Хамидулова З.С. 57
Ходанович Н.В. 92
Хомченко А.В. 29

Ч

Червяков А.А. 53, 93
Черных В.Д. 65
Чжо Й.К. 31
Чуков Н.А. 59

Ш

Шаталин А.А. 94
Шелков К.А. 32
Шерышев А.Е. 56
Шипунов Г.С. 33
Шишкин К.В. 57

II Международная конференция
«Композитные материалы и конструкции»
Тезисы

II International Conference
“Composite Materials and Constructions”
Abstracts



Издательство «Перо»
109052, Москва, Нижегородская ул., д. 29-33, стр. 15, ком. 536
Тел.: +7 495 973-72-28, 665-34-36
Подписано к использованию 30.11.2021.
Объём 1,56 Мбайт. Электрон. текстовые данные. Заказ 1074

ОРГАНИЗАТОР | ORGANIZER



КОНТАКТЫ | CONTACTS

125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4
Volokolamskoe shosse, 4, Moscow, 125993
aviacosmos@gmail.com
composite.mai.ru