

Оценка усталостной прочности углепластиков с различными типами гибридных матриц

Екатерина А. Косенко¹ kosenkokate@mail.ru  0000-0002-7808-7359

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский пр-т, 64, г. Москва, 125319, Россия

Аннотация. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря возможности создавать изделия пониженной массы с заданными эксплуатационными свойствами. В процессе эксплуатации композитные изделия подвергаются воздействию статических и циклических нагрузок, климатических и многих других факторов. Оценка усталостной прочности композиционных материалов и влияния на нее различных добавок и модификаторов является актуальной научно-практической задачей. В статье описана технология получения ПКМ с различными типами гибридных матриц, формируемых основным материалом связующего и материалом, представляющим в структуре композита самостоятельную «жидкую» фазу. На основе анализа кинетики отверждения в качестве материалов компонентов «жидкой» фазы были выбраны анаэробный полимерный материал (Loctite 638), силиконовый эластомер (Юнисил-9628) и синтетический воск. Испытания по оценке усталостной прочности осуществлялись путем приложения к образцам циклически изменяющихся нагрузок растяжение-сжатие. Нагрузка при выполнении циклических испытаний составила 70% от статической прочности образцов при растяжении. Остаточная прочность оценивалась путем испытания образцов на растяжение до полного разрушения после циклического нагружения. Представлены результаты испытаний на усталостную прочность углепластиков с различными типами гибридных матриц (формируемых различными компонентами «жидкой» фазы), анализ которых показал, что использование анаэробного полимерного материала в качестве компонента «жидкой» фазы гибридной матрицы позволяет повысить как начальную статическую прочность материала (на ~1%), так и остаточную прочность после циклического нагружения (на ~11%) по сравнению с данными показателями, полученными при испытании контрольных образцов. После выполнения циклического нагружения углепластиков с анаэробным полимерным материалом и силиконовым эластомером наблюдается повышение остаточной прочности по сравнению с предварительно выполненными статическими испытаниями на растяжение на ~8% и ~13% соответственно. Использование в качестве компонента «жидкой» фазы анаэробного полимерного материала и силиконового эластомера позволяет повысить модуль упругости углепластиков после циклического нагружения на ~13% и 5% соответственно по сравнению с результатами предварительных статических испытаний.

Ключевые слова: гибридная матрица, остаточная прочность, полимерные композиционные материалы, углепластик, усталостная прочность.

Evaluation of fatigue strength of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) with various types of hybrid matrices

Ekaterina A. Kosenko¹ kosenkokate@mail.ru  0000-0002-7808-7359

¹ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Leningradsky prospect, 64 Moscow, 125319, Russia

Abstract. Polymer composite materials (PCM) have found wide application in various industries due to the ability to create low-weight products with specified operational properties. During operation, composite products are exposed to static and cyclic loads, climatic and many other factors. Evaluation of the fatigue strength of composite materials and the influence of various additives and modifiers on it is an urgent scientific and practical task. The article describes the technology of obtaining PCM with various types of hybrid matrices formed by the main binder material and the material representing an independent "liquid" phase in the composite structure. Based on the analysis of the kinetics of curing, anaerobic polymer material (Loctite 638), silicone elastomer (Unisil-9628) and synthetic wax were selected as the materials of the components of the "liquid" phase. Fatigue strength assessment tests were carried out by applying cyclically varying tension-compression loads to the samples. The load during cyclic tests was 70% of the static tensile strength of the samples. The residual strength was evaluated by testing the tensile strength of the samples until complete destruction after cyclic loading. The results of fatigue strength tests of carbon fiber plastics with various types of hybrid matrices (formed by various components of the "liquid" phase) are presented. The analysis of the results showed that the use of an anaerobic polymer material as a component of the "liquid" phase of the hybrid matrix makes it possible to increase both the initial static strength of the material (by ~1%) and the residual strength after cyclic loading (by ~11%) compared with these indicators obtained during the testing of control samples. After performing cyclic loading, carbon fiber plastics with anaerobic polymer material and silicone elastomer have an increase in residual strength compared to previously performed static tensile tests by ~8% and ~13%, respectively. The use of an anaerobic polymer material and silicone elastomer as a component of the "liquid" phase makes it possible to increase the modulus of elasticity of carbon fiber plastics after cyclic loading by ~13% and 5%, respectively, compared with the results of preliminary static tests.

Keywords: hybrid matrix, residual strength, polymer composite materials, carbon fiber reinforced plastics, fatigue strength.

Для цитирования

Косенко Е.А. Оценка усталостной прочности углепластиков с различными типами гибридных матриц // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 2. С. 262–268. doi:10.20914/2310-1202-2022-2-262-268

For citation

Kosenko E.A. Evaluation of fatigue strength of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) with various types of hybrid matrices. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 2. pp. 262–268. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-2-262-268

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В условиях расширения областей применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–4], разработки новых составов и структур композитов [5–13] важной задачей является прогнозирование их долговечности с учетом влияния различных разрушающих факторов, в частности циклических нагрузок.

В условиях циклического нагружения в ПКМ происходит возникновение и накопление микрповреждений и дислокаций с последующим образованием и ростом макротрещины и поврежденности. Поврежденность системы, в соответствии с представлениями статистической физики, протекает со скоростью, зависящей от некоторых внешних факторов (механических, физических, химических и др.), а также от величины накопленной поврежденности. В свою очередь мера повреждения зависит от различных деградиационных процессов материалов, к которым относятся разрушение волокон и матрицы, расслоения и отрывы на поверхности раздела и пр [14–16]. Поэтому большой научно-практический интерес представляет возможность создания ПКМ, структура которых позволила бы снизить интенсивность деградиационных процессов в условиях циклического нагружения. Аналогом такой структуры является гетерогенная структура многих природных материалов, таких как живая древесина, некоторые виды слюды (в частности, мусковит), кость, ракушка. Эти материалы имеют слоистую структуру со слабыми поверхностями раздела и при достижении трещиной этой слабой поверхности происходит ее «стопорение» между компонентами материала [17, 18].

Создание в структуре ПКМ слабых поверхностей раздела (мягких промежуточных слоев) позволит реализовать механизмы разрушения аналогичные механизмам разрушения природных материалов и обеспечить высокие прочностные и деформационные свойства.

Так, добавление в состав матрицы компонентов, сохраняющих свое жидкое состояние и представляющих в структуре композита самостоятельную «жидкую» фазу, позволяет изменять весь комплекс свойств материала [19].

Использование в качестве компонента «жидкой» фазы анаэробного полимерного материала позволяет повысить прочностные свойства ПКМ как при положительной, так и при отрицательных температурах, силиконового эластомера – минимизировать потерю прочностных свойств при переходе в область отрицательных температур, а синтетического воска – повысить относительное удлинение композита при разрушении при положительной температуре [19].

Применение компонентов «жидкой» фазы способствует изменению фазовых характеристик, в частности приводит к снижению скачка теплоемкости при фазовом переходе. В наибольшей степени на величину скачка теплоемкости оказывает влияние анаэробный полимерный материал, а наименьшее – силиконовый эластомер в составе гибридной матрицы.

Выполненные статические испытания позволяют получить информацию о прочностных показателях конструкционного материала и влиянии тех или иных модификаторов на их изменение.

Оценку характеристик усталости ПКМ осуществляют в условиях циклического нагружения с постоянной амплитудой и частотой.

Цель работы – исследование влияния компонентов «жидкой» фазы гибридной матрицы на усталостную и остаточную прочность полимерных композиционных материалов.

В работе понятие остаточная прочность используется для значений прочности ПКМ, полученных в результате испытаний до их полного разрушения после циклического нагружения.

Материалы и методы

Для оценки усталостной прочности ПКМ с гибридными матрицами были изготовлены 4 серии образцов:

- 1) контрольные образцы (без компонентов «жидкой» фазы матрицы);
- 2) образцы с анаэробным полимерным материалом (Loctite 638) в составе гибридной матрицы;
- 3) образцы с силиконовым эластомером (Юнисил-9628) в составе гибридной матрицы;
- 4) образцы с синтетическим воском в составе гибридной матрицы.

Образцы всех серий изготавливались прессованием под давлением с отверждением в прессе при температуре 80 ± 2 °C из 6 слоев предварительно пропитанной эпоксидным связующим марки EPR 320 с отвердителем марки EPH 943 равнопрочной углеродной ткани на основе волокна марки T300. Компоненты «жидкой» фазы матрицы наносились между 3 и 4 слоями армирующей ткани вдоль будущих образцов (рисунок 1).

Образцы углепластиков всех серий были выполнены в форме лопатки фрезерованием. На концах образцов по обе стороны были закреплены накладки. Площадь поперечного сечения образцов составила $10 \times 1,4-2,2$ мм (разброс значений толщины образцов обусловлен наличием в структуре ПКМ компонентов «жидкой» фазы матрицы).

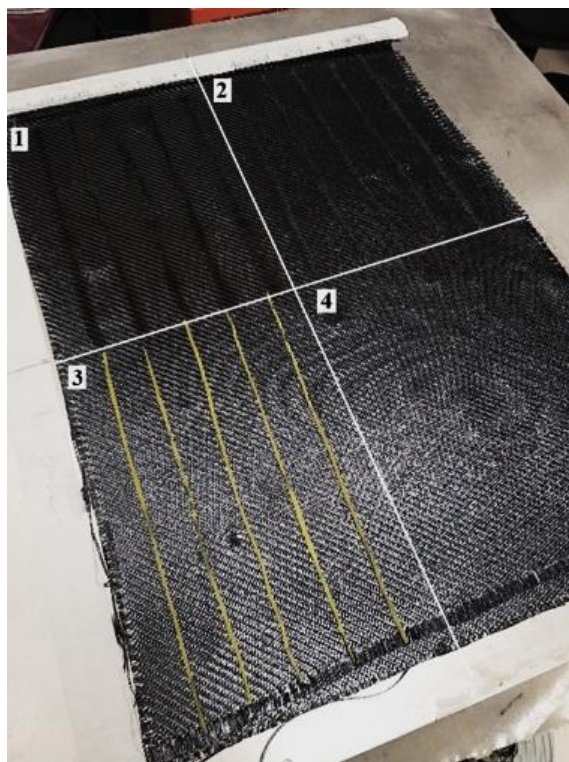


Рисунок 1. Процесс формирования пакета композита: нанесение компонентов «жидкой» фазы гибридной матрицы в процессе формирования образцов: 1 – зона с нанесенным анаэробным полимерным материалом; 2 – зона с нанесенным силиконовым эластомером; 3 – зона с нанесенным синтетическим воском; 4 – зона для изготовления контрольных образцов (без компонентов «жидкой» фазы матрицы)

Figure 1. The process of forming a composite package: application of components of the "liquid" phase of the hybrid matrix in the process of forming samples: 1 – zone with applied anaerobic polymer material; 2 – zone with applied silicone elastomer; 3 – zone with applied synthetic wax; 4 – zone for the manufacture of control samples (without components of the "liquid" phase of the matrix)

Испытания по определению усталостной прочности осуществлялись с помощью универсальной испытательной машины Zwick Z 100 в три этапа: определение статической прочности образцов и выбор параметров нагружения для выполнения циклических испытаний, выполнение 100 циклов нагружения, определение остаточной прочности испытываемых образцов.

Результаты

Для определения режимов циклических испытаний подготовленных серий образцов углепластиков были предварительно выполнены статические испытания по определению их предела прочности при растяжении на универсальной испытательной машине Zwick Z 100 со скоростью нагружения 10 мм/мин. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Циклические испытания осуществлялись путем приложения к образцу циклически изменяющихся нагрузок растяжение-сжатие. Испытания осуществлялись с помощью испытательной машины Zwick Z 100 на следующих режимах: скорость нагружения: 10 мм/мин, количество циклов нагружения: 100, нагрузка: 70% от прочности при растяжении.

При циклическом нагружении напряжение составило: контрольных образцов углепластика $\sigma_{\text{макс}} = 515$ МПа; углепластиков с анаэробным полимерным материалом $\sigma_{\text{макс}} = 465$ МПа; с силиконовым эластомером $\sigma_{\text{макс}} = 420$ МПа; с синтетическим воском в составе матрицы $\sigma_{\text{макс}} = 400$ МПа.

После 100 циклов нагружения образцы испытывали до полного разрушения с целью получения остаточной прочности. Полученные значения остаточной прочности представлены в таблице 2.

Таблица 1.

Результаты статических испытаний на растяжение образцов углепластиков перед циклическими испытаниями

Table 1.

Results of static tensile tests of carbon fiber reinforced plastics samples before cyclic tests

Тип матрицы образцов Type of sample matrix	Модуль упругости, ГПа Modulus of elasticity, GPa	Абсолютное разрывное усилие, Н Absolute breaking force, N	Предел прочности, МПа Tensile strength, MPa	Относительное удлинение при разрушении, % Elongation at fracture, %
Эпоксидная Epoxy	38	9054	574	2,2
Эпоксидная с анаэробным полимерным материалом Epoxy with anaerobic polymer material	35	9033	579	2,6
Эпоксидная с силиконовым эластомером Epoxy with silicone elastomer	38	7698	526	2,2
Эпоксидная с синтетическим воском Epoxy with synthetic wax	33	8194	504	2,4

Таблица 2.

Результаты испытаний образцов углепластиков с гибридными матрицами (остаточная прочность)

Table 2.

Results of tests of carbon fiber reinforced plastics samples with hybrid matrices (residual strength)

Тип матрицы образцов Type of sample matrix	Модуль упругости, ГПа Modulus of elasticity, GPa	Абсолютное разрывное усилие, Н Absolute breaking force, N	Предел прочности, МПа Tensile strength, MPa	Относительное удлинение при разрушении, % Elongation at fracture, %
Эпоксидная Эпоху	37	9471	564	2,3
Эпоксидная с анаэробным полимерным материалом Epoxy with anaerobic polymer material	40	9557	630	1,8
Эпоксидная с силиконовым эластомером Epoxy with silicone elastomer	40	8961	606	1,6
Эпоксидная с синтетическим воском Epoxy with synthetic wax	30	8203	407	1,6

Обсуждение

По полученным результатам (таблица 2) можно сделать заключение, что в наибольшей степени на величину остаточной прочности оказывает влияние анаэробный полимерный материал в структуре углепластика и способствует повышению данного показателя на ~11% по сравнению с контрольными образцами. У образцов с силиконовым эластомером в составе матрицы наблюдается увеличение остаточной прочности на ~7% по сравнению со значением данного показателя у контрольных образцов. Синтетический воск в составе матрицы композита приводит к снижению остаточной прочности на ~28% по сравнению с остаточной прочностью контрольных образцов.

При этом следует отметить, что после выполнения 100 циклов нагружения у образцов углепластиков с анаэробным полимерным материалом и силиконовым эластомером остаточная прочность выше начальной статической прочности (таблица 1) на 51 МПа (или ~8%) и на 80 МПа (или ~13%) соответственно. У контрольных образцов и углепластиков с синтетическим воском потеря прочности составила 10 МПа (или ~2%) и 97 МПа (или ~19%) соответственно.

Учитывая свойство компонентов «жидкой» фазы замедлять или вовсе тормозить рост трещины в матрице материала [20], факт повышения остаточной прочности после циклического нагружения можно объяснить с позиции запаздывающего разрушения, описанного в монографии «Этюды по механике композитов» Полиловым А.Н.: «...при кратковременном нагружении свойства матрицы не успевают измениться и разрушение происходит при достижении растущими напряжениями предела статической прочности.

При длительном (или циклическом) нагружении приложенные напряжения (или их размах) постоянны и разрушение происходит, когда рост дефектов в матрице снизит реализацию прочности волокон до уровня приложенных напряжений. Такой характер разрушения делает естественной формулировку модели двухфазного материала, в котором только один компонент – матрица – чувствителен ко времени нагружения, а прочность второго компонента – волокон – имеет статистический разброс и хотя не зависит от времени, но зависит от степени поврежденности матрицы». Таким образом, анаэробный полимерный материал и силиконовый эластомер в структуре гибридной матрицы способствуют сокращению роста поврежденности матрицы композита при циклических нагружениях предположительно за счет реализации механизма поглощения энергии разрушения компонентом «жидкой» фазы.

Также следует отметить изменение значения модуля упругости после выполнения 100 циклов нагружения, относительное изменение которого в процессе циклических нагружений рассматривается в качестве параметра сплошности (поврежденности). У образцов с анаэробным полимерным материалом и силиконовым эластомером в составе гибридной матрицы наблюдается повышение модуля упругости на 5 ГПа (или на ~13%) и на 2 ГПа (или 5%) соответственно. У образцов с синтетическим воском после 100 циклов нагружения значение модуля упругости наоборот уменьшилось на 3 ГПа (или на ~9%), а у контрольных образцов на 1 ГПа (или на ~3%).

У всех серий образцов после выполнения 100 циклов нагружения кроме контрольных образцов наблюдается падение значения относительного удлинения при разрушении. Наименьшая потеря данного показателя наблюдается у углепластиков с силиконовым эластомером (значение относительного удлинения уменьшилось на 0,6% (или в 1,38 раза)), у углепластиков с анаэробным полимерным материалом и с синтетическим воском значение относительного удлинения уменьшилось на 0,8% (или в 1,44 и 1,5 раза соответственно) (таблицы 1 и 2).

Заключение

На основании анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Использование анаэробного полимерного материала в качестве материала «жидкой» фазы позволяет достичь наибольшего среди сравниваемых типов образцов значения остаточной прочности углепластиков.

2. Использование анаэробного полимерного материала и силиконового эластомера в качестве материалов «жидкой» фазы способствует повышению значения остаточной прочности и модуля упругости после 100 циклов нагружения по сравнению с результатами начальной статической прочности данных типов образцов.

3. Использование синтетического воска в качестве материала «жидкой» фазы приводит к наибольшему среди сравниваемых типов образцов снижению показателя остаточной прочности и модуля упругости после выполнения 100 циклов нагружения.

Благодарности

Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № FFSM-2020-0011 (2019–2020), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ.

Литература

- 1 Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. №6-7 (89). С. 29-37. doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37
- 2 Краев И.Д., Попков О.В., Шульдешов Е.М., Сорокин А.Е., Юрков Г.Ю. Перспективы использования кремнийорганических полимеров при создании современных материалов и покрытий различного назначения // Труды ВИАМ. 2017. №12. С. 48-62. doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-5-5
- 3 Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. №6. С. 61-68. doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7
- 4 Тимошков П.Н., Хрульков А.В. Анализ технологий производства изделий из непрерывно армированных полимерных композиционных материалов безавтоклавными способами изготовления (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 11. С. 8. doi: 10.18477/2307-6046-2017-0-11-8-8
- 5 Чэнь Я., Городецкий М.А., Нелюб В.А., Малышева Г.В. Алгоритм оптимизации технологических режимов формирования композитов на основе эпоксидной матрицы // Технология металлов. 2019. №2. С. 18-22. doi: 10.31044/1684-2499-2019-2-0-18-22
- 6 Nelyub V.A., Malysheva G.V. Modern treatment technologies of carbon fibre for ensuring the high strength carbon fibre reinforced plastic production // MATEC Web of Conferences. 2017. V. 129. P. 02001. doi: 10.1051/mateconf/201712902001
- 7 Nelyub V.A., Malysheva G.V., Komarov I.A. New technologies for producing multifunctional reinforced carbon plastics // Materials Science Forum. 2021. V. 1037. P. 196–202. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.196
- 8 Nelyub V.A., Komarov I.A. Technology of treatment of carbon fibers under electromagnetic influences of various origins to produce high-strength carbon fiber reinforced plastics // Russian Metallurgy (Metally). 2021. № 2021(13). P. 1696–1699. doi: 10.1134/S003602952113019X
- 9 Gorodetskii M.A., Nelyub V.A., Malysheva G.V., Shaurov A.Y. et al. Technology of forming and the properties of reinforced composites based on an inorganic binder // Russian Metallurgy (Metally). 2018. № 13. P. 1195–1198. doi: 10.1134/S0036029518130074
- 10 Nelyub V.A. Technologies of metallization of carbon fabric and the properties of the related carbon fiber reinforced plastics // Russian Metallurgy. 2018. № 13. P. 1199–1201. doi: 10.1134/S0036029518130189
- 11 Maung P.P., Htet T.L., Malysheva G.V. Simulation and optimization of vacuum assisted resin infusion process for large-sized structures made of carbon fiber-reinforced plastic // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 709. №. 2. P. 022041. doi: 10.1088/1757-899X/709/2/022041
- 12 Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., Malysheva G.V. Thixotropy hysteresis and structure formation in elastomeric suspensions // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. № 9(4). P. 603–608. doi: 10.1134/S2075113318040238
- 13 Malysheva G.V., Guzeva T.A. Technological support for decreasing the porosity of polymer composite products // Russian Metallurgy (Metally). 2021. № 2021(13). P. 1692–1695. doi: 10.1134/S0036029521130139
- 14 Орешко Е.И., Ерасов В.С., Гриневич Д.В., Шершак П.В. Обзор критериев прочности материалов // Труды ВИАМ. 2019. №9. С. 108-126. doi: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126
- 15 Кирюшина В.В., Ковалева Ю.Ю., Степанов П.А., Коваленко П.В. Исследование влияния масштабного фактора на прочностные свойства полимерных композиционных материалов // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2019. №1. С. 97–106. doi: 10.26583/npe.2019.1.09

- 16 Арутюнян А.Р. Формулировка критерия усталостной прочности композиционных материалов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2020. Т. 7 (65). №. 3. С. 511–517. doi: 10.21638/spbu01.2020.313
- 17 Полилов А.Н., Татусь Н.А. Технологическая механика композитов, основанная на изучении опыта природы в создании прочных биологических материалов-конструкций // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 1. С. 59–85. doi: 10.52261/02346206_2021_1_59
- 18 Берлин А.А. Об усталостной прочности природных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 7. С. 2–3. doi: 10.31044/1994-6260-2019-0-7-2-3
- 19 Kosenko E.A., Baurova N.I., Zorin V.A. Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastics with Various Types of Hybrid Matrices at Negative Temperatures // Russian Metallurgy (Metally). 2021. № 2021(13). P. 1705–1708. doi: 10.1134/S0036029521130103
- 20 Kosenko E.A., Nelyub V.A. Evaluation of the stress–strain state of a polymer composition material with a hybrid matrix // Polymer Science – Series D. 2022. № 15(2). P. 240–244. doi: 10.1134/S1995421222020137.

References


- 1 Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review). Proceedings of VIAM. 2020. no. 6-7 (89). pp. 29-37. doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37 (in Russian).
- 2 Kraev I.D., Popkov O.V., Shuldeshev E.M., Sorokin A.E. et al. Prospects for the use of organosilicon elastomers in the development of modern polymer materials and coatings for various purposes. Proceedings of VIAM. 2017. no. 12. pp. 48-62. doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-5-5
- 3 Timoshkov P.N., Hrulkov A.V., Yazvenko L.N. Composite materials in automotive industry (review). Proceedings of VIAM. 2017. no.6. pp. 61-68. doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7 (in Russian).
- 4 Timoshkov P.N., Khrulkov A.V. Analysis of continuously reinforced polymer composites production methods using out-of-autoclave technologies (review). Proceedings of VIAM. 2017. no. 11. pp. 8. doi: 10.18477/2307-6046-2017-0-11-8-8 (in Russian).
- 5 Chan Yanyan, Gorodetskiy M.A., Nelyub V.A., Malysheva G.V. Optimization algorithm of technological processes of molding the composites based on epoxy matrix. Technology of metals. 2019. no. 2. pp. 18-22. doi: 10.31044/1684-2499-2019-2-0-18-22 (in Russian).
- 6 Nelyub V.A., Malysheva G.V. Modern treatment technologies of carbon fibre for ensuring the high strength carbon fibre reinforced plastic production. MATEC Web of Conferences. 2017. vol. 129. pp. 02001. doi: 10.1051/mateconf/201712902001
- 7 Nelyub V.A., Malysheva G.V., Komarov I.A. New technologies for producing multifunctional reinforced carbon plastics. Materials Science Forum. 2021. vol. 1037. pp. 196–202. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.196
- 8 Nelyub V.A., Komarov I.A. Technology of treatment of carbon fibers under electromagnetic influences of various origins to produce high-strength carbon fiber reinforced plastics. Russian Metallurgy (Metally). 2021. no. 2021(13). pp. 1696–1699. doi: 10.1134/S003602952113019X
- 9 Gorodetskii M.A., Nelyub V.A., Malysheva G.V., Shaurov A.Y. et al. Technology of forming and the properties of reinforced composites based on an inorganic binder. Russian Metallurgy (Metally). 2018. no. 13. pp. 1195–1198. doi: 10.1134/S0036029518130074
- 10 Nelyub V.A. Technologies of metallization of carbon fabric and the properties of the related carbon fiber reinforced plastics. Russian Metallurgy. 2018. no. 13. pp. 1199–2101. doi: 10.1134/S0036029518130189
- 11 Maung P.P., Htet T.L., Malysheva G.V. Simulation and optimization of vacuum assisted resin infusion process for large-sized structures made of carbon fiber-reinforced plastic. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. vol. 709. no. 2. pp. 022041. doi: 10.1088/1757-899X/709/2/022041
- 12 Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., Malysheva G.V. Thixotropy hysteresis and structure formation in elastomeric suspensions. Inorganic Materials: Applied Research. 2018. no. 9(4). pp. 603–608. doi: 10.1134/S2075113318040238
- 13 Malysheva G.V., Guzeva T.A. Technological support for decreasing the porosity of polymer composite products. Russian Metallurgy (Metally). 2021. no. 2021(13). pp. 1692–1695. doi: 10.1134/S0036029521130139
- 14 Oreshko E.I., Erasov V.S., Grinevich D.V., Shershak P.V. Review of criteria of durability of materials. Proceedings of VIAM. 2019. no. 9. pp. 108-126. doi: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126. (in Russian).
- 15 Kiryushina V.V., Kovaleva Yu.Yu., Stepanov P.A., Kovalenko P.V. A study into the scaling factor effects on the strength properties of polymer composite materials. Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika. 2019. no. 1. pp. 97–106. doi: 10.26583/npe.2019.1.09 (in Russian).
- 16 Arutyunyan A.R. Formulation of the fatigue fracture criterion of composite materials. Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy. 2020. vol. 7 (65). no. 3. pp. 511–517. doi: 10.21638/spbu01.2020.313 (in Russian).
- 17 Polilov A.N., Tatus N.A. Technological mechanics of composites, based on the study of nature experience in the creation of durable biological materials-structures. Engineering and automation problems. 2021. no. 1. pp. 59–85. doi: 10.52261/02346206_2021_1_59. (in Russian).
- 18 Berlin A.A. On the fatigue strength of natural materials. All materials. Encyclopedic reference book. 2019. no. 7. pp. 2–3. doi: 10.31044/1994-6260-2019-0-7-2-3 (in Russian).

19 Kosenko E.A., Baurova N.I., Zorin V.A. Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastics with Various Types of Hybrid Matrices at Negative Temperatures. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021. no. 2021(13). pp. 1705–1708. doi: 10.1134/S0036029521130103

20 Kosenko E.A., Nelyub V.A. Evaluation of the stress–strain state of a polymer composition material with a hybrid matrix. *Polymer Science – Series D*. 2022. no. 15(2). pp. 240–244. doi: 10.1134/S1995421222020137

Сведения об авторах

Екатерина А. Косенко к.т.н., доцент, кафедра производства и ремонта автомобилей и дорожных машин, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский пр-т, 64, г. Москва, 125319, Россия, kosenkokate@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7808-7359>

Вклад авторов


Екатерина А. Косенко написала рукопись, корректировала ее до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Ekaterina A. Kosenko Cand. Sci. (Engin.), associate professor, manufacturing and repair of vehicles and road-construction machines, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Leningradsky prospect, 64 Moscow, 125319, Russia, kosenkokate@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7808-7359>

Contribution

Ekaterina A. Kosenko wrote the manuscript, correct it before filling in editing and is responsible for plagiarism

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила 18/04/2022	После редакции 10/05/2022	Принята в печать 02/06/2022
Received 18/04/2022	Accepted in revised 10/05/2022	Accepted 02/06/2022