

Оценка показателя жесткости углепластиков с гибридной матрицей

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. Одной из важнейших характеристик конструкционных материалов является их жесткость. Обеспечение требуемой жесткости является залогом долговечности и эффективной эксплуатации конструкции. Вариация составов полимерных композиционных материалов (ПКМ), внедрение в их структуру различных добавок и модификаторов приводит к изменению не только эксплуатационных свойств композитов, но также и их жесткости. Достижение положительного эффекта по ряду одних свойств может привести к потере других. В данной статье представлено описание технологии формирования полимерных композиционных материалов с гибридной матрицей. Особенностью данных материалов является то, что гибридная матрица формируется двумя материалами, один из которых (основное связующее) после формирования полностью отверждается, а второй сохраняет свое «жидкое» состояние и представляет в структуре композита самостоятельную фазу. Такие ПКМ обладают переменной по объему материала жесткостью, вследствие чего возникает необходимость экспериментального исследования влияния количества и схемы локации компонента «жидкой» фазы на данный показатель. Изложена технология лабораторного метода определения жесткости образцов ПКМ, заключающаяся в измерении максимального прогиба плоского образца под действием статически приложенной нагрузки. Измерение осуществляется на образцах углепластиков с гибридной матрицей, формируемой эпоксидным связующим и силиконовым эластомером. Оценивалось влияние количества и схемы локации силиконового эластомера в структуре композита, а также масштабного эффекта на величину максимального прогиба. Количество силиконового эластомера суммарно во всех зонах локации принималось 0,25 и 0,50 мл, при этом варьировалось количество зон локации и их направление относительно длины образца. Установлено, что продольная локация силиконового эластомера в образцах ПКМ приводит к наибольшему снижению их жесткости. Количество силиконового эластомера в зоне локации не оказывает существенного влияния на изменение жесткости образцов. Увеличение количества слоев армирующей ткани в 2 раза позволяет снизить прогиб испытываемых образцов в 7–10 раз в зависимости от прикладываемой нагрузки, а удвоение ширины образцов и зон локации силиконового эластомера приводит к уменьшению максимального прогиба в 2 раза. С увеличением толщины ПКМ у образцов с силиконовым эластомером значения максимального прогиба под действием различных статически приложенных нагрузок аналогичны значениям данного показателя углепластиков такой же толщины без компонента «жидкой» фазы.

Ключевые слова: гибридная матрица, жесткость, полимерные композиционные материалы, прогиб, углепластик.

Evaluation of the stiffness index of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) with a hybrid matrix

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

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

Abstract. One of the most important characteristics of structural materials is their stiffness. Ensuring the required stiffness is the key to durability and efficient operation of the structure. Variation in the compositions of polymer composite materials (PCM), the introduction of various additives and modifiers into their structure leads to changes not only in the operational properties of composites, but also in their stiffness. Achieving a positive effect on a number of some properties can lead to the loss of others. This article describes the technology of forming polymer composite materials with a hybrid matrix. The peculiarity of these materials is that the hybrid matrix is formed by two materials, one of which (the main binder) is completely cured after molding, and the second retains its "liquid" state and represents a separate phase in the composite structure. Such PCM have a variable stiffness of material, which makes it necessary to experimentally study the effect of the quantity and location scheme of the "liquid" phase component on this indicator. The technology of the laboratory method for determining the stiffness of PCM samples is described, which consists in measuring the maximum deflection of a flat sample under the action of a statically applied load. The measurement was carried out on carbon fiber reinforced plastic samples with a hybrid matrix formed by an epoxy binder and a silicone elastomer. The influence of the amount and location scheme of silicone elastomer in the composite structure, as well as the scale effect on the maximum deflection was evaluated. The amount of silicone elastomer was taken in a total of 0.25 mL and 0.50 mL in all locations, varying the number of locations and their direction relative to the length of the sample. It was found that the longitudinal location of silicone elastomer in PCM samples leads to the greatest decrease in their rigidity. The amount of silicone elastomer in the location zone does not significantly affect the change in the stiffness of the samples. Increasing the number of layers of reinforcing fabric by 2 times allows to reduce the deflection of the test samples by 7–10 times depending on the applied load. Doubling the width of samples and silicone elastomer locations results in a 2-fold reduction in maximum deflection. With an increase in the thickness of PCM in samples with silicone elastomer, the values of maximum deflection under the action of various statically applied loads are similar to the values of this parameter of carbon fibers of the same thickness without a component of the "liquid" phase.

Keywords: hybrid matrix, stiffness, polymer composite materials, deflection, carbon fiber reinforced plastic.

Введение

В настоящее время одними из наиболее перспективных конструкционных материалов являются полимерные композиционные материалы (ПКМ). Композиты используют при производстве как мелких, но конструктивно сложных изделий, так и крупногабаритных, несущих значительные нагрузки, конструкций [1, 2].

В процессе эксплуатации конструкции изделий из ПКМ подвергаются различным по направлению и характеру внешним нагрузкам (статическим, динамическим, циклическим) [3–7]. Обеспечение заданных прочностных и жесткостных свойств реализуется путем оптимального выбора компонентов ПКМ, схем армирования и технологии формирования [8–15].

Для цитирования

Косенко Е.А. Оценка показателя жесткости углепластиков с гибридной матрицей // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 2. С. 282–289. doi:10.20914/2310-1202-2022-2-282-289

For citation

Kosenko E.A. Evaluation of the stiffness index of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) with a hybrid matrix. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 2. pp. 282–289. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-2-282-289

Основные напряжения, возникающие под действием внешних нагрузок в конструкции из волокнистых ПКМ, воспринимают высокопрочные и высокомодульные волокна, придавая жёсткость и прочность в направлении ориентации волокон, а совместную работу отдельных волокон обеспечивает матрица за счет собственной жесткости и взаимодействия на границе раздела фаз [16–18].

При расчете конструкции на изгиб помимо напряжений, возникающих от действия внешних сил, важным показателем также является величина перемещения под действием этих же сил. Одно из требований к элементам конструкций заключается в том, чтобы перемещение не превосходило некоторого допустимого значения, то есть выполнялось условие жесткости или конструктивной прочности, так как низкая жесткость конструктивного элемента может привести к нежелательным колебаниям конструкции с большой амплитудой и появлению дополнительных напряжений.

В ряде случаев для достижения заданных эксплуатационных и технологических характеристик прибегают к различного рода модификациям структуры ПКМ. При этом существует вероятность изменения жесткости конструкции.

Так, результаты проведенных исследований показали, что добавление в состав матрицы ПКМ силиконового эластомера, представляющего в структуре матрицы самостоятельную «жидкую» фазу, способствует минимизации потери прочности при растяжении в условиях экстремально

низких температур (-30 и -50 °C), что делает ПКМ с гибридной матрицей данного типа перспективным материалом для использования при производстве изделий, работающих в условиях отрицательных температур [19,20]. Однако ПКМ с гибридной матрицей, компоненты «жидкой» фазы которых расположены в структуре композита по заданным схемам обладает переменной по объему жесткостью.

Цель работы – оценка влияния количества и схемы локации силиконового эластомера, а также масштабного эффекта на величину максимального прогиба под действием диапазона прикладываемых к образцам статических нагрузок.

Материалы и методы

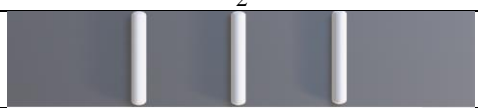



Для оценки влияния количества и схемы локации силиконового эластомера на жесткость ПКМ были изготовлены 10 серий образцов с различным количеством и схемами локации компонента «жидкой» фазы (серии № 1–10) и соответствующая серия контрольных образцов (без компонента «жидкой» фазы) (серия № 11) (таблица 1). Для оценки влияния масштабного эффекта на жесткость углепластиков с гибридной матрицей были изготовлены серия образцов удвоенной ширины с удвоенным количеством зон локации силиконового эластомера (серия № 12) и соответствующая серия контрольных образцов (серия № 13), серия образцов с удвоенным количеством слоев армирующей ткани (серия № 14) и соответствующая серия контрольных образцов (серия № 15) (таблица 1).

Таблица 1.
Схемы локации и количество силиконового эластомера в структуре углепластиков

Table 1.
Location schemes and the amount of silicone elastomer in the structure of carbon fiber reinforced plastics

| Образец (Серия) Sample (Series) | Схема локации силиконового эластомера Silicone elastomer location scheme | Количество силиконового эластомера, мл Amount of silicone elastomer, ml |
|------------------------------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 |  | 0,25 |
| 2 |  | 0,50 |
| 3 |  | 0,50 |
| 4 |  | 0,25 |
| 5 |  | 0,50 |
| 6 |  | 0,50 |
| 7 |  | 0,25 |
| 8 |  | 0,50 |

Продолжение таблицы 1 | Continuation of table 1 |

| 1 | 2 | 3 |
|----|--|-------------|
| 9 |  | 0,25 |
| 10 |  | 0,50 |
| 11 | Контроль Control | 0,00 |
| 12 |  | 0,50 + 0,50 |
| 13 | Контрольный образец удвоенной ширины Double width control sample | 0,00 |
| 14 |  | 0,50 |
| 15 | Контрольный образец увеличенной толщины Control sample of increased thickness | 0,00 |

Для изготовления образцов углепластиков использовалась биаксиальная углеродная ткань марки 12К-1270–410 (+45/-45°), 2 слоя (4 слоя для образцов серий № 14 и № 15), пропитанных эпоксидным связующим марки L с отвердителем ЕРН 161. Между 1 и 2 слоями (2 и 3 слоями для образцов серии № 14) наносился компонент «жидкой» фазы (силиконовый эластомер марки Юнисил-9628) в суммарном количестве на один образец 0,25 мл и 0,5 мл (таблица 1). Формование образцов осуществлялось вакуумформованием по препреговой технологии [20] с отверждением при температуре 23 ± 2 °C в течении 24 часов.

В результате были получены серии образцов длиной $l = 250$ мм со следующими значениями поперечных сечений: $S = 1,2 \times 20 = 24 \text{ мм}^2$ (серии № 1–6), $S = 1,3 \times 20 = 26 \text{ мм}^2$ (серии № 7 и № 8), $S = 1,4 \times 20 = 28 \text{ мм}^2$ (серии № 9–11), $S = 1,0 \times 40 = 40 \text{ мм}^2$ (серии № 12), $S = 1,4 \times 40 = 56 \text{ мм}^2$ (серии № 13), $S = 2,6 \times 20 = 52 \text{ мм}^2$ (серии № 14 и № 15). Разнотолщинность образцов объясняется усадкой силиконового эластомера, величина которой варьируется в зависимости от количества силиконового эластомера и количества армирующего материала.

Для выполнения измерений образцы закреплялись консольно на расстоянии 30 мм, обеспечивая длину свободной части равную 220 мм. Нагрузка прикладывалась к свободному концу образца на расстоянии 20 мм (рисунок 1).

Оценка изменения жесткости углепластиков в зависимости от схемы локации и количества силиконового эластомера, а также

влияния масштабного эффекта, осуществлялась путем измерения максимального прогиба под действием статической нагрузки (P) равной 0,1 Н, 0,2 Н, 0,3 Н, 0,4 Н, 0,5 Н

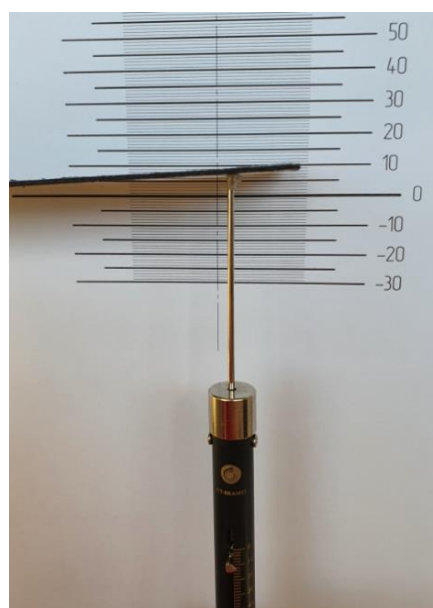


Рисунок 1. Измерение прогиба углепластиков с гибридной матрицей

Figure 1. Measurement of deflection of carbon fiber reinforced plastics with hybrid matrix

Результаты

В результате измерений были получены значения максимального прогиба испытуемых серий образцов (таблица 2). Для наглядности представления результаты измерений округлены до целочисленных значений.

Таблица 2.

Средний максимальный прогиб испытываемых серий образцов углепластиков

Table 2.

The average maximum deflection of the tested series of carbon fiber reinforced plastics samples

| Образец Sample | Величина прогиба, v_{\max} , мм в зависимости от прикладываемой нагрузки, P, Н Deflection value, v_{\max} , mm depending on the applied load, P, N | | | | |
|--|---|-----|-----|-----|-----|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| 1 | 27 | 57 | 78 | 100 | 115 |
| $\Delta v_{\max 1}^* = v_{\max 1} - v_{\max 11}^*$ | 8 | 18 | 22 | 30 | 26 |
| 2 | 31 | 57 | 82 | 101 | 114 |
| $\Delta v_{\max 2} = v_{\max 2} - v_{\max 11}$ | 12 | 18 | 26 | 31 | 25 |
| 3 | 30 | 60 | 84 | 103 | 116 |
| $\Delta v_{\max 3} = v_{\max 3} - v_{\max 11}$ | 11 | 21 | 28 | 33 | 27 |
| 4 | 30 | 55 | 79 | 97 | 114 |
| $\Delta v_{\max 4} = v_{\max 4} - v_{\max 11}$ | 11 | 16 | 23 | 27 | 25 |
| 5 | 30 | 54 | 81 | 98 | 118 |
| $\Delta v_{\max 5} = v_{\max 5} - v_{\max 11}$ | 11 | 15 | 25 | 28 | 29 |
| 6 | 29 | 54 | 76 | 96 | 111 |
| $\Delta v_{\max 6} = v_{\max 6} - v_{\max 11}$ | 10 | 15 | 20 | 26 | 22 |
| 7 | 23 | 42 | 61 | 78 | 92 |
| $\Delta v_{\max 7} = v_{\max 7} - v_{\max 11}$ | 4 | 3 | 5 | 8 | 3 |
| 8 | 23 | 45 | 68 | 83 | 100 |
| $\Delta v_{\max 8} = v_{\max 8} - v_{\max 11}$ | 4 | 6 | 12 | 13 | 11 |
| 9 | 23 | 44 | 65 | 82 | 94 |
| $\Delta v_{\max 9} = v_{\max 9} - v_{\max 11}$ | 4 | 5 | 9 | 12 | 5 |
| 10 | 22 | 44 | 65 | 85 | 102 |
| $\Delta v_{\max 10} = v_{\max 10} - v_{\max 11}$ | 3 | 5 | 9 | 15 | 13 |
| 11 | 19 | 39 | 56 | 70 | 89 |
| 12 | 15 | 27 | 39 | 53 | 64 |
| $\Delta v_{\max 12} = v_{\max 12} - v_{\max 13}$ | 6 | 9 | 12 | 17 | 20 |
| 13 | 9 | 18 | 27 | 35 | 44 |
| 14 | 3 | 6 | 9 | 12 | 16 |
| $\Delta v_{\max 14} = v_{\max 14} - v_{\max 15}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 15 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 |

* индекс при значении максимального прогиба, обозначающий номер серии испытываемых образцов

*index at the value of the maximum deflection, indicating the number of the series of test samples

Обсуждение

Из представленных данных (таблица 2) видно, что у всех испытываемых образцов с силиконовым эластомером в составе матрицы (кроме образцов серии №14) наблюдается увеличение прогиба по сравнению с образцами без компонента «жидкой» фазы. Так у образцов серий № 1–6 наблюдается увеличение прогиба в среднем на 20–40% в зависимости от прикладываемой нагрузки, а у образцов серий № 7–10 на 3–18%. При этом среднее значение величины прогиба практически не зависит от количества силиконового эластомера (сравнение по группам серий № 1–3, № 4–6, № 7–8, № 9–10 (таблица 2)). На величину прогиба оказывает влияние схема локализации силиконового эластомера. Так, снижение

значения прогиба наблюдается у образцов с диагональным и поперечным нанесением компонента «жидкой» фазы (серии № 7–10).

У углепластиков удвоенной ширины (с удвоенным количеством зон локализации компонента «жидкой фазы») силиконовый эластомер в составе матрицы также приводит к увеличению величины прогиба (сравнение серий № 12 и № 13) на 30–40% в зависимости от прикладываемой нагрузки.

Не оказывает влияния на величину прогиба наличие силиконового эластомера в образцах углепластиков увеличенной толщины (сравнение серий № 14 и № 15).

Точность результатов измерений оценивалась на основании показателя среднего квадратического отклонения (S) (таблица 3).

Таблица 3.
Среднее квадратическое отклонение результатов измерения максимального прогиба серий образцов углепластиков с гибридной матрицей

Table 3.
Root-mean-square deviation of the results of measuring the maximum deflection of a series of CFRP specimens with a hybrid matrix

| Образец Sample | Среднее квадратическое отклонение результатов измерения максимального прогиба, S, мм в зависимости от прикладываемой нагрузки, P, Н The mean square deviation of the measurement results of the maximum deflection, S, mm, depending on the applied load, P, N | | | | |
|-------------------|--|------|------|------|------|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| 1 | 1,14 | 1,95 | 3,63 | 4,88 | 3,83 |
| 2 | 1,52 | 1,87 | 1,30 | 1,14 | 1,52 |
| 3 | 0,84 | 3,11 | 2,59 | 3,87 | 3,08 |
| 4 | 0,84 | 1,10 | 2,92 | 3,08 | 2,17 |
| 5 | 3,27 | 3,97 | 3,65 | 2,95 | 3,03 |
| 6 | 1,30 | 3,05 | 2,59 | 3,05 | 2,92 |
| 7 | 1,30 | 2,07 | 2,97 | 2,49 | 3,70 |
| 8 | 2,35 | 1,64 | 1,14 | 3,21 | 2,30 |
| 9 | 0,55 | 1,73 | 2,30 | 2,28 | 3,27 |
| 10 | 0,55 | 2,17 | 3,67 | 4,18 | 5,90 |
| 11 | 1,30 | 1,30 | 1,79 | 2,00 | 2,49 |
| 12 | 0,55 | 2,07 | 3,16 | 0,55 | 1,48 |
| 13 | 0,84 | 1,10 | 1,41 | 0,84 | 1,10 |
| 14 | 0,00 | 0,55 | 1,41 | 1,82 | 2,68 |
| 15 | 0,55 | 1,14 | 0,55 | 1,10 | 1,10 |

Для оценки изменения показателя максимального прогиба в зависимости от прикладываемой нагрузки по формуле (1) были определены значения относительного прогиба для образцов каждой серии (таблица 4).

$$\delta_v = \frac{v_{i\max} - v_{i\max-1}}{v_{i\max-1}}, \quad (1)$$

где $v_{i\max}$ – максимальный прогиб образца на i -том этапе нагружения (мм), i – этап нагружения (1 – 0,1 Н, 2 – 0,2 Н, 3 – 0,3 Н и т. д.).

Таблица 4.
Относительный прогиб образцов углепластика с гибридными матрицами

Table 4.
Relative deflection of carbon fiber samples with hybrid matrices

| Образец Sample | Величина относительного прогиба, δ_v , мм в зависимости от прикладываемой нагрузки, P, Н The magnitude of the relative deflection, δ_v , mm depending on the applied load, P, N | | | | |
|-------------------|--|------|------|------|------|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| 1 | 0,00 | 1,11 | 0,37 | 0,28 | 0,15 |
| 2 | 0,00 | 0,84 | 0,44 | 0,23 | 0,13 |
| 3 | 0,00 | 1,00 | 0,40 | 0,23 | 0,13 |
| 4 | 0,00 | 0,83 | 0,44 | 0,23 | 0,18 |
| 5 | 0,00 | 0,80 | 0,50 | 0,21 | 0,20 |
| 6 | 0,00 | 0,86 | 0,41 | 0,26 | 0,16 |
| 7 | 0,00 | 0,83 | 0,45 | 0,28 | 0,18 |
| 8 | 0,00 | 0,96 | 0,51 | 0,22 | 0,20 |
| 9 | 0,00 | 0,91 | 0,48 | 0,26 | 0,15 |
| 10 | 0,00 | 1,00 | 0,48 | 0,31 | 0,20 |
| 11 | 0,00 | 1,05 | 0,44 | 0,25 | 0,27 |
| 12 | 0,00 | 0,80 | 0,44 | 0,36 | 0,21 |
| 13 | 0,00 | 1,00 | 0,50 | 0,30 | 0,26 |
| 14 | 0,00 | 1,00 | 0,50 | 0,33 | 0,33 |
| 15 | 0,00 | 1,00 | 0,50 | 0,33 | 0,25 |

У всех испытуемых серий образцов наблюдается линейная зависимость приращения величины прогиба с увеличением прикладываемой нагрузки. Величина относительного прогиба в зависимости от типа образцов варьируется в диапазонах: 1,11–0,8 мм (при $P = 0,2$ Н), 0,51–0,37 мм (при $P = 0,3$ Н), 0,36–0,21 (при $P = 0,4$ Н) и 0,33–0,13 мм (при $P = 0,5$ Н).

Увеличение ширины образцов и соответствующее удвоение количества зон локации

силиконового эластомера (сравнение серий № 12 и № 3) приводит к уменьшению прогиба в среднем в 2 раза. При увеличении количества слоев углеродной ткани при формовании, толщина готовых образцов увеличилась в ~2 раза при этом величина прогиба сократилась в 7–10 раз в зависимости от прикладываемой нагрузки (сравнение серий № 14 и № 3). В таблице 5 представлены значения констант подобия.

Таблица 5.

Константы подобия для образцов увеличенной ширины и количества силиконового эластомера и увеличенной толщины

Table 5.

Similarity constants for samples of increased width and amount of silicone elastomer and increased thickness

| Образец Sample | Константы подобия, c в зависимости от прикладываемой нагрузки, P, N Similarity constants, c depending on the applied load, P, N | | | | |
|-------------------|--|------|------|------|------|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| 12 | 0,50 | 0,45 | 0,46 | 0,51 | 0,55 |
| 14 | 0,10 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,14 |

Заклучение

Сокращение величины прогиба (повышение жесткости конструкции) обеспечивается за счет выбора оптимальной схемы локации компонента «жидкой» фазы.

Наибольшая величина прогиба наблюдается при продольном нанесении силиконового эластомера (серии № 1–6).

Повышению жесткости способствует диагональное и поперечное нанесение силиконового эластомера (образцы серий № 7–10). Так, сравнивая серии образцов № 1 (с продольной локацией) и №7 (с диагональной локацией (3 зоны)) можно отметить, что диагональное нанесение силиконового эластомера позволяет снизить величину максимального прогиба на 15-26%, а поперечное (серия образцов № 9 (3 зоны)) - на 13-23% в зависимости от прикладываемой нагрузки.

В наибольшей степени на величину жесткости испытываемых образцов углепластиков с гибридной матрицей оказывает влияние

толщина образцов. Увеличение количества слоев армирующей ткани в 2 раза позволяет снизить прогиб испытываемых образцов в 7–10 раз в зависимости от прикладываемой нагрузки (сравнение серий № 14 и № 3).

При удвоении ширины образцов и соответственно зон локации силиконового эластомера наблюдается уменьшение максимального прогиба в 2 раза (сравнение серий № 12 и № 3).

С увеличением толщины величина максимального прогиба ПКМ с силиконовым эластомером в составе гибридной матрицы аналогична величине прогиба ПКМ такой же толщины без компонента «жидкой» фазы (сравнение серий № 14 и № 15).

Благодарности

Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № FSFM-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 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
- 3 Рудской А.И., Баурова Н.И. Технологическая наследственность при производстве и эксплуатации конструкционных материалов // Технология металлов. 2019. №2. С 2-10. doi: 10.31044/1684-2499-2019-2-0-2-10
- 4 Трунилина А.В., Баурова Н.И. Полимерные композиты со свойствами биодegradации // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. №1. С. 9-13. doi: 10.31044/1994-6260-2019-0-1-9-13
- 5 Баурова Н.И., Зорин В.А. Выбор моделей для оценки долговечности полимеров на различных масштабных уровнях // Теоретические основы химической технологии. 2018. №5. С. 567-572. doi: 10.1134/S0040357118050019
- 6 Grib V.V., Zorin V.A., Baurova N.I. Determination of the resources of machine components made of polymeric composite materials on the basis of cumulative evidence // Polymer Science, Series D. 2018. №. 4. P. 431-435. doi: 10.1134/S1995421218040068
- 7 Баурова Н.И., Зорин В.А., Приходько В.М. Информационная модель состояния технической системы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. №6. С. 11-16.
- 8 Gorodetskiy 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
- 9 Nelyub V.A. Technologies of metallization of carbon fabric and the properties of the related carbon fiber reinforced plastics // Russian Metallurgy. 2018. № 13. P. 1199–2101. doi: 10.1134/S0036029518130189
- 10 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
- 11 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

- 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 Nelyub V.A., Malysheva G.V., Komarov I.A. New technologies for producing multifunctional reinforced carbon plastics // *Materials Science Forum*. 2021. P. 196–202. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.196
- 15 Maung P.P., Thant Kyaw P., Malysheva G.V. Optimization of technological modes for moulding composites using vacuum infusion technology // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. № 971(3). P. 032048. doi: 10.1088/1757-899X/971/3/032048
- 16 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
- 17 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
- 18 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
- 19 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
- 20 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

References

- 1 Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review). *Proceedings of VIAM*. 2020. №6-7 (89). pp. 29-37. doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37 (in Russian).
- 2 Timoshkov P.N., Khrulkov A.V., Yazvenko L.N. Composite materials in the automotive industry (review). *Proceedings of VIAM*. 2017. no. 6. pp. 61–68. doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7 (in Russian).
- 3 Rudskoy A.I., Baurova N.I. Technological heredity when producing and operating the structural materials. *Tehnologia metalloc (Technology of metals)*. 2019. no. 2. pp. 2-10. doi: 10.31044/1684-2499-2019-2-0-2-10 (in Russian).
- 4 Trunilina A.V., Baurova N.I. Polymer composites with biodegradation properties. *All materials. Encyclopaedic reference manual*. 2019. no.1. pp. 9-13. doi: 10.31044/1994-6260-2019-0-1-9-13 (in Russian).
- 5 Baurova N.I., Zorin V.A. Choice of models for evaluating the durability of polymers at different scale levels. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*. 2018. no. 5. pp. 567-572. doi: 10.1134/S0040357118050019. (in Russian).
- 6 Grib V.V., Zorin V.A., Baurova N.I. Determination of the resources of machine components made of polymeric composite materials on the basis of cumulative evidence. *Polymer Science, Series D*. 2018. no. 4. pp. 431-435. doi: 10.1134/S1995421218040068
- 7 Baurova N.I., Zorin V.A., Prikhodko V.M. Information model of technical system state. *All materials. Encyclopaedic reference manual*. 2017. no.6. pp. 11-16. (in Russian).
- 8 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
- 9 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
- 10 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
- 11 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
- 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 Nelyub V.A., Malysheva G.V., Komarov I.A. New technologies for producing multifunctional reinforced carbon plastics. *Materials Science Forum*. 2021. pp. 196–202. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.196
- 15 Maung P.P., Thant Kyaw P., Malysheva G.V. Optimization of technological modes for moulding composites using vacuum infusion technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. no. 971(3). pp. 032048. doi: 10.1088/1757-899X/971/3/032048
- 16 Orshko 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).
- 17 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. Nuclear energy*. 2019. no. 1. pp. 97–106. doi: 10.26583/npe.2019.1.09. (in Russian).


18 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).

19 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

20 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


Сведения об авторах

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

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

Information about authors

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

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

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

| | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Поступила 13/04/2022 | После редакции 11/05/2022 | Принята в печать 03/06/2022 |
| Received 13/04/2022 | Accepted in revised 11/05/2022 | Accepted 03/06/2022 |