ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. ХИМИЯ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, 2024, том 519, с. 25–31

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 539.3:620.17

Статья посвящается юбилею академика РАН Вячеслава Михайловича Бузника

ДИФФУЗИОННАЯ МОДЕЛЬ УПРУГИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВО ВЛАЖНОЙ СРЕДЕ

© 2024 г. Член-корреспондент РАН М. П. Лебедев[1], О. В. Старцев[1,2,*], Г. В. Корниенко[2]

Поступила 02.12.2024 г.
После доработки 09.01.2025 г.
Принято к публикации 17.01.2025 г.

Рассмотрена эмпирическая модель изменения модуля сдвига углепластика от времени пребывания во влажной среде при повышенной температуре (60°С). Исследована кинетика влагопереноса и изменения модуля сдвига в плоскости листа эпоксидного углепластика в режимах сушки и увлажнения при 60°С. Показано, что модуль сдвига материала изменяется закону диффузии Фика с постоянным коэффициентом эффективной диффузии.

Ключевые слова: углепластик, модуль сдвига, диффузия, влагосодержание, моделирование

DOI: 10.31857/S2686953524060043, **EDN:** BORSCF

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений многогранной научной деятельности академика РАН В.М. Бузника является арктическое материаловедение. В основополагающих работах [1, 2] дан системный анализ состояния и перспектив развития новых материалов для использования в различных климатических условиях. Успех освоения холодных территорий во многом определяется наличием материалов, которые могут надежно и эффективно работать в экстремальных условиях этих регионов. Из большого количества новых разработанных материалов должны быть выбраны те, которые сохранят прочность, деформативность и долговечность и снизят аварийность техники и сооружений при сезонных амплитудах температуры, превосходящих 100°С.

В полной мере это относится к полимерным композиционным материалам (**ПКМ**) на основе термореактивных матриц [3]. Примером исследования 5-летнего старения серии углепластиков и стеклопластиков авиационного назначения в арктических условиях является работа, выполненная с участием академика В.М. Бузника [4]. В условиях Крайнего Севера изменения массы образцов ПКМ, а также других механических характеристик материала будут малы, и для их выявления предлагается использовать комплексный подход – одновременное измерение различных показателей материала.

В настоящее время ведутся углубленные исследования закономерностей деструкции, гидролиза, микрорастрескивания и других структурных и физико-химических превращений в эпоксидных матрицах ПКМ при низкотемпературных климатических воздействиях [5]. Доказано, что в таких условиях значащим фактором старения ПКМ являются влажность воздуха, роса, осадки. Эпоксидные матрицы ПКМ относительно гидрофильны [3], однако поглощение даже малого количества воды (менее 1% от массы образца) вызывает пластификацию, активирует дополимеризацию, окисление и структурную релаксацию полимерных связующих, существенно изменяя комплекс деформационно-прочностных показателей P (пределы прочности и модули упругости при растяжении, сжатии, изгибе, сдвиге) композитов [6, 7].

Временны́е зависимости количества сорбированной влаги от времени выдержки $w(t)$ для разных типов и схем армирования ПКМ иссле-

[1]*ФИЦ "Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук" Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, 677980 Якутск, Россия*

[2]*Геленджикский центр климатических испытаний ВИАМ им. Георгия Владимировича Акимова — НИЦ "Курчатовский институт", 353466 Геленджик, Россия*

**E-mail: startsev@iptpn.ysn.ru*

дованы достаточно подробно. В обзорах [6–8] показано, что диффузия влаги успешно моделируется законами Фика и что этот метод актуален и в наши дни. Однако моделирование кинетики изменения показателей P в воде или влажных средах остается нерешенной задачей. В большинстве случаев исследователи определяют уровни изменения значений P после завершения времени увлажнения. Например, углепластик на основе эпоксидного полимера Araldite 2012 выдерживался в воде и за 7, 98 и 147 сут сорбировал не более 0.4 мас. % воды от массы образца [9]. За это время его модуль упругости в направлении армирования уменьшился на 9, 21 и 25% соответственно. По данным работы [10], после 3.5 месяцев пребывания в дистиллированной воде при 50°C за счет влаги прирост массы образца однонаправленного эпоксидного стеклопластика E-glass/FGE238 составил 0.71%, и его модуль упругости уменьшился с 8 до 3 ГПа в образцах с укладкой [90°]. Аналогичным образом, выдержка углепластика IMA/M21E в стационарных условиях при температурах от 45 до 85°C и относительной влажности 100% показала фиковскую зависимость $w(t)$, и при сорбции 0.76, 0.82, 1.24% воды модуль упругости снизился на 9, 26 и 31% соответственно [11].

Временну́ю зависимость $P(t)$ эпоксидного углепластика в работе [12] удовлетворительно аппроксимировали уравнением экспоненциального типа, которое в общем случае имеет вид [13]:

$$P = \eta\left(1 - e^{-\lambda t}\right) - \psi\ln\left(1 + \theta t\right) + P_0, \qquad (1)$$

где P_0 и P – механический показатель композита в исходном состоянии и после t дней влажностного воздействия, η – параметр материала после отверждения, ψ – параметр материала, характеризующий сопротивление внешнему воздействию (обычно константа, специфичная для материала), λ и θ – параметры состояния материала, представляющие влияние окружающей среды. Слагаемые $\eta(1 - e^{-\lambda t})$ и $\psi ln(1 + \theta t)$ выражают процессы улучшения свойств (доотверждения) и ухудшения (деструкции) соответственно.

Наряду с использованием эмпирических соотношений типа (1) более перспективным вариантом моделирования $P(t)$ могут стать базовые законы молекулярной физики. Молекулярная основа пластификации полимеров влагой хорошо известна [14]. Молекулы воды, взаимодействуя с гидрофильными группами эпоксидного полимера посредством водородных связей, ослабляют межмолекулярное взаимодействие. Гибкость и деформативность полимерных цепей возрастают, в результате чего модули упругости влагонасыщенных полимеров понижаются.

В ряде работ, например, в [15–17], для ПКМ установлена линейная зависимость $P(w)$:

$$P = P_0 - \psi_p w, \qquad (2)$$

где P_0 и P – механический показатель ПКМ в исходном состоянии и при содержании влаги w, ψ_p – коэффициент пластифицирующего воздействия влаги по показателю P.

Если композит помещается в воду или влажную воздушную среду, то количество влаги, поступившей в объем исследуемого образца, определяется фундаментальными молекулярными законами о пропорциональности диффузионного потока молекул воды градиенту их концентрации, а также изменения градиента их концентрации со временем (законами Фика).

Второй закон Фика в одномерной форме [18]:

$$\begin{gathered}\frac{\partial c}{\partial t} = D_w \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, c\left(x, t = 0\right) = 0, \\ c\left(x = 0, t\right) = c\left(x = R, t\right) = c_0\end{gathered} \qquad (3)$$

(где c – концентрация влаги, t – время выдержки образца, x – направление движения влаги, D_w – коэффициент диффузии влаги, R – коэффициент формы образца ($\frac{1}{R^2} = \frac{1}{L^2} + \frac{1}{W^2} + \frac{1}{H^2}$ – эффективный размер образца, L, W, H – длина, ширина и толщина образца), c_0 – предельное значение концентрации влаги в образце) в предположении неизменности P_0 и ψ_p в соотношении (2) можно записать в виде:

$$\begin{gathered}\frac{\partial P}{\partial t} = D_P \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \\ P\left(x, t = 0\right) = 0, \\ P\left(x = 0, t\right) = P\left(x = R, t\right) = P_0\end{gathered} \qquad (4)$$

(где D_P – эффективный коэффициент диффузии) и моделировать изменение механического показателя P от времени нахождения во влажной среде, используя формализм фиковской диффузии. Фронт влаги, перемещающийся в объем образца композита по закону (3), является также фронтом изменения пластифицирующего влияния влаги, в результате чего показатель P материала изменяется по тому же закону диффузии Фика с постоянным коэффициентом эффективной диффузии D_P.

Решения уравнений (3) и (4), усредненных по объему, имеют вид [18]:

$$z(t) = z_0\left(1 - 8SUM_n\right); SUM_n = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\exp\left[-n^2 d_z t\right]}{n^2};$$
$$d_z = D_z/R^2;\ n = (2i+1);$$
$$i = [0..N-1];\ \frac{1}{R^2} = \frac{2}{L^2} + \frac{1}{H^2}, \quad (5)$$

где z принимает значения либо $w = \int_0^V c dV = 100(m - m_0)/m_0$ (%) для уравнения (3) (c – концентрация влаги в объеме (V) образца, m и m_0 (г) – масса образца в момент времени t и в начальный момент времени), либо $g = 100(G - G_0)/G_0$ (%) – относительное изменение модуля сдвига для уравнения (4) в предположении, что G_f (модуль сдвига волокна) и G_m (модуль сдвига эпоксидной матрицы) сопоставимы по величине и слабо меняются по объему, чтобы принять их за усредненное значение G – модуль сдвига образца в момент времени t, G_0 – модуль сдвига образца в исходном состоянии, $D_z = D_w$ – коэффициент диффузии для уравнения (3), $D_z = D_P$ – коэффициент эффективной диффузии модуля сдвига для уравнения (4), R – эффективный размер образца, L и H — длина и толщина квадратной пластины, $z_0 = w_0$ – предельное значение влагонасыщения для уравнения (3) на стадии сушки и увлажнения, $z_0 = g_0$ — предельное значение относительного изменения модуля сдвига на стадии сушки и максимальное на стадии полного влагонасыщения для уравнения (4), $N = 9$.

Целью данной работы было установление зависимости между количеством влаги, поглощенной образцом ПКМ, и изменением массы образца ПКМ и его упругих характеристик (модуля сдвига в плоскости листа).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для подтверждения возможности моделирования $P(t)$ с помощью уравнения (4) нами исследован 23-слойный углепластик с укладкой [0, 90], изготовленный из клеевого препрега КМКУ-2м.120 (наполнитель – углеродная лента ЭЛУР-П, матрица – эпоксидное связующее ВКС-14-2м) [19]. Пластины углепластика толщиной 3.5 ± 0.2 мм были защищены тонким слоем фторэпоксидной эмали ВЭ-46, нанесенной на эпоксидную грунтовку ЭП-0104 [19]. Для исследований влагопереноса было выбрано 6 вариантов углепластика, экспонированных 8 и 13 лет на открытой климатической площадке умеренно теплого климата (Геленджик, Россия). За такое длительное время в эпоксидной матрице ВКС-14-2м завершились процессы дополимеризации и деструкции поверхностного слоя, и структурное состояние стабилизировалось. Поэтому углепластик после такой обработки является удобным материалом для исследования пластифицирующего действия влаги [5, 6].

В качестве контролируемого показателя P был выбран модуль сдвига в плоскости листа G, измеренный методом кручения пластины по ГОСТ 33843-2016. С помощью этого метода можно проводить многократные повторные нагружения одних и тех же квадратных образцов ПКМ в области малых гуковских деформаций, не изменяя их свойства и структуру, и измерять G с коэффициентами вариации на уровне 2.2%. Методика измерений G при увлажнении ПКМ и доказательство справедливости соотношения (2) приведены в работе [20].

Из пластин углепластика **Г1**–**Г6**, отличающихся цветом лакокрасочного покрытия (светло-серый, светло-голубой, изумрудный, голубой, темно-зеленый, красный) было вырезано по 5 квадратных образцов со сторонами $L = 100$ мм и $L = 50$ мм (табл. 1). Изменение цвета покрытия влияет на его температурный режим и может изменять состояние материала при длительной эксплуатации.

Подготовленные образцы, накопившие влагу за время выдержки, сушили при 60°C в течение 50 сут до постоянной массы. После этого проводили стадию сорбции: высушенные образцы выдерживали над поверхностью воды в эксикаторах при относительной влажности воздуха 98 ± 2% и температуре 60°C. Образцы взвешивали на аналитических весах с точностью до 0.1 мг. Величину относительного влагосодержания определяли по результатам взвешивания

Таблица 1. Материал для исследования

Пластина	Срок экспозиции, год	Цвет ЛКП[a]	Средняя толщина H, мм
Г1	13	светло-серый	3.306
Г2	8	серо-голубой	3.181
Г3	8	изумрудный	3.542
Г4	13	голубой	3.695
Г5	13	темно-зеленый	3.249
Г6	8	красный	3.250

[a]ЛКП – лакокрасочное покрытие.

до и после выдержки в эксикаторе по формуле: $w = 100(m - m_0)/m_0$ (%).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее было установлено, что углепластики при экспозиции на открытом воздухе накапливают до 1% влаги [20]. Различия в относительном влагосодержании w углепластика на стадии сушки оказались несущественными, но на стадии сорбции заметно возросли в зависимости от размера образца. Эксперименты показали, что за 65 сут увлажнения масса образцов размером 100 × 100 мм, вырезанных из пластин **Г1**, **Г2**, **Г3**, возросла на 2.1 ± 0.1 % (рис. 1), тогда как для образцов размером 50 × 50 мм, вырезанных из тех же пластин, увеличение массы составило 3.3 ± 0.7% (рис. 2).

Результаты аппроксимации зависимостей $w(t)$ одномерной моделью Фика (3) как для образцов из пластин **Г1**, **Г2** и **Г3**, так и для всей серии исследованных образцов, представлены в табл. 2.

Коэффициент детерминации модели (3) оказался высоким (R^2 = 0.993 ± 0.003). Стадия увлажнения показала иную закономерность. Среднее значение w_0 выросло в среднем в 3.1 раза для пластин с L = 100 мм и в 6.3 раза для пластин с

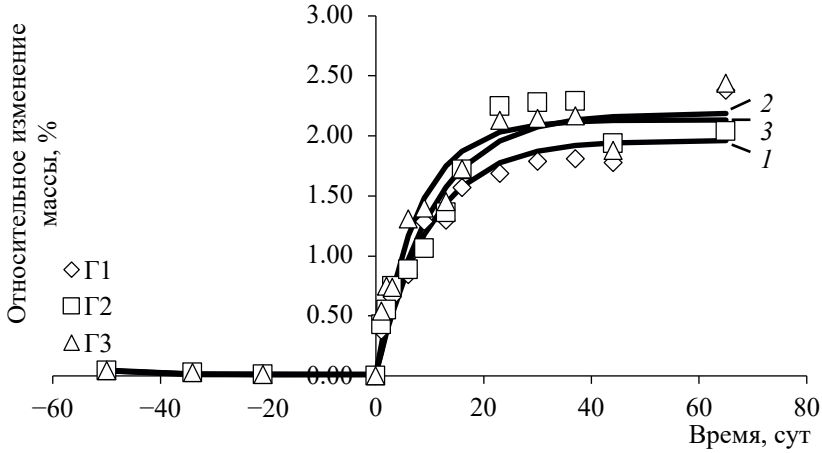

Рис. 1. Кинетика сушки и увлажнения образцов углепластика размером 100 × 100 мм, вырезанных из пластин **Г1**, **Г2**, **Г3**. Сплошные линии – аппроксимация моделью (3) для образцов пластин **Г1** (*1*), **Г2** (*2*), **Г3** (*3*).

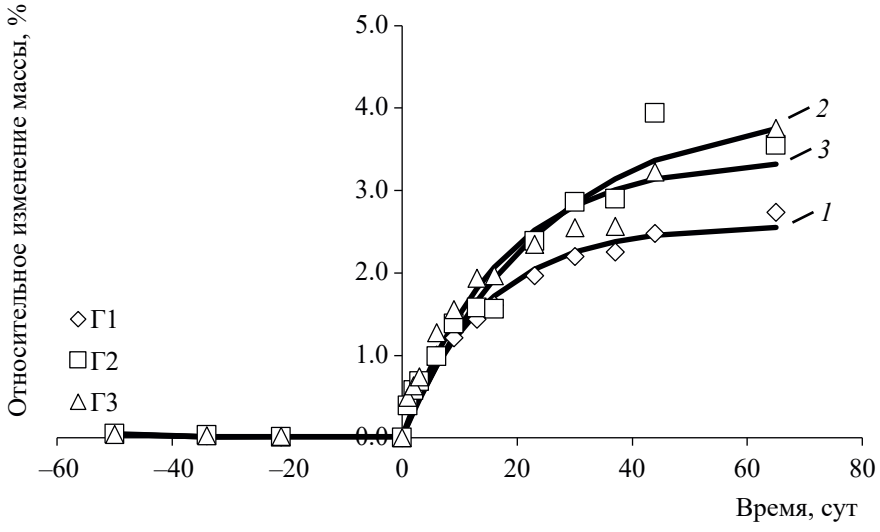

Рис. 2. Кинетика сушки и увлажнения образцов углепластика размером 50 × 50 мм, вырезанных из пластин **Г1**, **Г2**, **Г3**. Сплошные линии – аппроксимация моделью (3) для образцов пластин **Г1** (*1*), **Г2** (*2*), **Г3** (*3*).

Таблица 2. Результаты применения модели диффузии Фика (3) к зависимости относительного изменения массы от времени $w(t)$

Пластина	Стадия сушки[a]			Стадия увлажнения[a]		
	w_0, %	D_w, мм^2 сут$^{-1}$	R^2	w_0, %	D_w, мм^2 сут$^{-1}$	R^2
Г1	0.80/0.75	0.019/0.024	0.997/0.993	2.2/3.0	0.065/0.039	0.960/0.993
Г2	0.71/0.68	0.021/0.024	0.994/0.991	2.3/5.5	0.078/0.017	0.932/0.943
Г3	0.56/0.60	0.023/0.029	0.994/0.989	2.4/5.0	0.11/0.024	0.947/0.976
Г4	0.77/0.79	0.023/0.028	0.997/0.992	2.3/5.9	0.075/0.015	0.982/0.985
Г5	0.57/0.59	0.016/0.023	0.995/0.984	1.8/3.4	0.052/0.019	0.972/0.979
Г6	0.61/0.63	0.017/0.022	0.993/0.988	1.3/2.2	0.051/0.020	0.906/0.974
Среднее	0.67/0.67	0.019/0.025	0.995/0.990	2.1/4.2	0.072/0.022	0.950/0.958

[a]В числителе указаны значения параметров для пластин со стороной $L = 100$ мм, в знаменателе – со стороной $L = 50$ мм.

Таблица 3. Предельные значения модуля сдвига T в плоскости листа (ГПа)

Пластина	Размер стороны L, мм	T_0	T_1	T_2
Г1	100	4.35	4.94	3.98
	50	4.41	4.79	3.55
Г2	100	5.61	6.16	5.09
	50	5.06	5.19	3.87
Г3	100	4.27	4.45	3.87
	50	4.52	5.02	3.54
Г4	100	3.58	3.72	3.20
	50	3.85	4.27	2.99
Г5	100	4.41	4.78	4.21
	50	4.70	5.14	3.83
Г6	100	5.31	5.85	5.16
	50	5.66	6.08	4.44

$L = 50$ мм. Также значительно изменились средние значения коэффициента диффузии влаги D_w. При этом и для стадии сорбции близкие к единице средние значения коэффициента детерминации ($R^2 = 0.954 \pm 0.004$) подтверждают адекватность одномерной фиковской модели влагопереноса.

При высыхании образцов пластифицирующее действие влаги ослаблялось, в результате чего возрастали значения относительного изменения модуля сдвига $g(t)$. На стадии сорбции этот показатель закономерно уменьшался. В табл. 3 представлены предельные значения модуля сдвига в плоскости листа в начале сушки (T_0), в начале увлажнения (T_1) и в конце увлажнения (T_2).

Примеры кинетических зависимостей $g(t)$ для образцов **Г1**, **Г2**, **Г3** (рис. 3), а также аналогичные

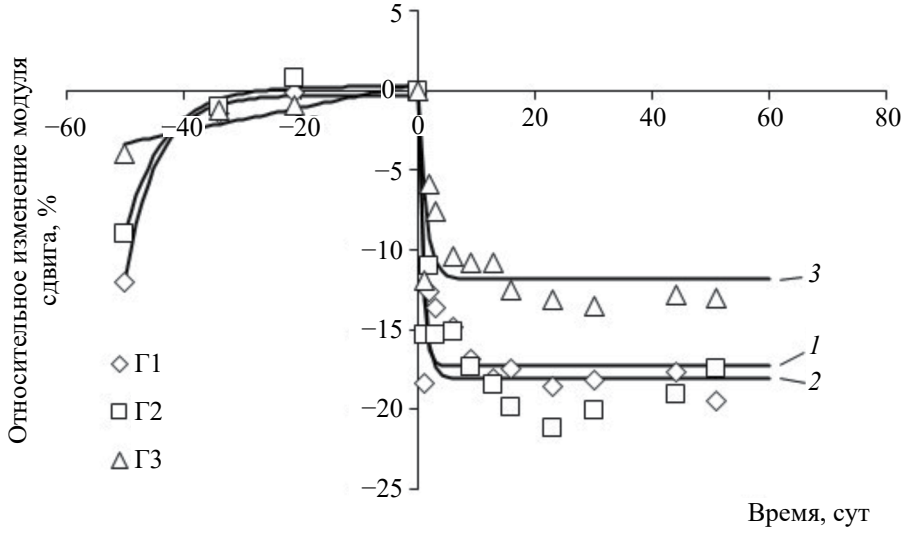

Рис. 3. Кинетика относительного изменения модуля сдвига образцов углепластика размером 100 × 100 мм, вырезанных из пластин **Г1**, **Г2**, **Г3**. Символы – экспериментальные данные, линии – аппроксимация моделью (4) для образцов пластин **Г1** (*1*), **Г2** (*2*), **Г3** (*3*).

Таблица 4. Результаты применения молекулярной модели (4) к зависимости относительного изменения модуля сдвига от времени сушки и увлажнения $g(t)$

Пластина	Стадия сушки[a]		Стадия увлажнения[a]		R^2
	g_0, %	$D_P \times 10^{-3}$, мм^2 сут$^{-1}$	g_0, %	$D_P \times 10^{-3}$, мм^2 сут$^{-1}$	
Г1	−12/−12	1.9/1.3	−17/−21	14/0.37	0.902/0.804
Г2	−9.3/−7.6	1.5/1.9	−18/−23	11/0.19	0.915/0.835
Г3	−3.3/−13	1.4/1.3	−12/−22	7.8/0.63	0.913/0.813
Г4	−3.0/−13	2.1/5.1	−12/−23	6.3/0.54	0.836/0.839
Г5	−8.6/−13	2.6/1.2	−12/−26	6.3/0.13	0.976/0.785
Г6	−1.8/−8.6	2.0/1.8	−12/−35	7.9/0.069	0.866/0.855
Среднее	−6.3/−11	1.9/2.1	−14/−25	8.9/0.32	0.901/0.822

[a] В числителе указаны значения параметров для пластин со стороной L = 100 мм, в знаменателе – со стороной L = 50 мм.

экспериментальные зависимости $g(t)$ для всей серии исследованных образцов пластин **Г1–Г6** были аппроксимированы моделью (4). Результаты аппроксимации суммированы в табл. 4.

ВЫВОДЫ

Таким образом, полученные результаты показывают, что действие влаги в различных климатических условиях (в т.ч. и в условиях холодного климата [5]) могут влиять на изменение механических показателей по закону диффузии Фика. При сравнении показателей g_0 и D_P для всей серии измерений установлено, что пластифицирующее влияние влаги различно на стадиях сушки и увлажнения, а также существенно зависит от размеров исследованных образцов. При этом главным результатом проведенного математического анализа оказалось подтверждение адекватности молекулярной модели (4). Средние значения коэффициента детерминации имели достаточны высокие значения ($R^2 = 0.86 \pm 0.04$).

Дальнейшим развитием моделирования кинетики изменения пластифицирующего действия влаги ПКМ на основе фундаментальных законов молекулярной физики могут стать варианты 3-мерных моделей, учитывающих рецептурный состав и степень полимеризации термореактивных матриц, анизотропию влагопереноса, форму и размеры образцов, протекание реакций гидролиза и дополимеризации при стационарных и циклических режимах термовлажностного воздействия.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная работа финансировалась за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00009, https://rscf.ru/project/24-19-00009/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Buznik V.M., Kablov E.N.* // Her. Russ. Acad. Sci. 2017. V. 87. № 5. P. 397–408. https://doi.org/10.1134/S101933161705001X
2. *Бузник В.М., Каблов Е.Н.* Арктическое материаловедение. Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2018. 44 с.
3. *Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А.* // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 122–144. https://doi.org/10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144
4. *Shvedkova A.K., Petrova A.P., Buznik V.M.* // Polym. Sci. Ser. D. 2016. V. 9. № 2. P. 165–171. https://doi.org/10.1134/S1995421216020210
5. *Lebedev M.P., Startsev O.V.* // Russ. Chem. Bull. 2023. V. 72. № 2. P. 553–565. https://doi.org/10.1007/s11172-023-3819-1
6. *Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S.* // Russ. Metall. 2012. V. 2012. № 4. P. 323–329. https://doi.org/10.1134/S0036029512040040
7. *Hussnain S.M., Shah S.Z.H., Megat-Yusoff P.S.M., Hussain M.Z.* // Polym. Degrad. Stab. 2023. V. 215. № 1. P. 110452–110460. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110452
8. *Shreepannaga, Vijaya Kini M., Pai D.* // Mater. Today: Proc. 2022. V. 52. P. 689–696. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.084
9. *Ahmed F., Mhamdia R., Mohammed S.M.A.K., Benyahia F., Albedah A., Bouiadjra B.A.B.* // Sci. Eng. Compos. Mater. 2024. V. 31. № 1. P. 20220235–20220246. https://doi.org/10.1515/secm-2022-0235
10. *Quino G., Tagarielli V.L., Petrinic N.* // Compos. Sci. Technol. 2020. V. 199. P. 108316. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108316
11. *Shetty K., Bojja R., Srihari S.* // Adv. Compos. Lett. 2020. V. 29. P. 1–9. https://doi.org/10.1177/2633366x20926520
12. *Liu X., Su Q., Zhu J., Song X.* // Polymers. 2023. V. 15. № 1. P. 2490–2509. https://doi.org/10.3390/polym15112490

13. *Yang S., Chu M., Chen F., Fu M., Lv Y., Xiao Z., Feng N., Song Y., Li J.* // Front. Mater. 2022. V. 9. P. 862872–862886. https://doi.org/10.3389/fmats.2022.862872
14. *Levine H., Slade L.* // Water Sci. Rev. 1988. V. 3. No. 1. P. 79–185. https://doi.org/10.1017/CBO9780511552083.002
15. *Nandagopal R.A., Boay C.G., Narasimalu S.* // Compos. Struct. 2020. V. 236. P. 111876–111892. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111876
16. *Gao C., Zhou C.* // J. Mater. Sci. 2019. V. 54. № 11. P. 8289–8301. https://doi.org/10.1007/s10853-019-03399-7
17. *Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S., Frenz S., Ogin S.L., Foreman C., Dorey R.A.* // J. Compos. Mater. 2022. V. 56. № 14. P. 2189–2199. https://doi.org/10.1177/00219983221091465
18. *Crank J.* The mathematics of diffusion. 2nd edn. Clarendon press, Oxford, 1975. 414 p.
19. *Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф.* // Труды ВИАМ. 2016. № 8 (44). С. 52–59. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7
20. *Startsev O.V., Kornienko G.V., Gladkikh A.V., Gorbovets M.A.* // Polym. Sci. Ser. D. 2024. V. 17. № 3. P. 606–614. https://doi.org/10.1134/S1995421224701041

Dedicated to the jubilee of Vyacheslav Buznik, Academician of the RAS

DIFFUSION MODEL OF ELASTIC PROPERTIES OF FIBER REINFORCED PLASTIC IN HUMIDIFICATION CONDITIONS

Corresponding Member of the RAS V. P. Lebedev[a], O. V. Startsev[a,b,#], G. V. Kornienko[b]

[a]*Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk 677980, Russian Federation*

[b]*NRC "Kurchatov Institute" – VIAM, 353466 Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: startsev@iptpn.ysn.ru*

In this paper, there is consideration of a model of the dependence of in-plane shear modulus of the carbon fiber reinforced plastics on the time spent in thermally humid conditions is considered. This study is based on the Academician V.M. Buznik's ideas of the effect of molecular transformations in polymer matrix on their macroscopic properties. The moisture transfer kinetics and changes of the in-plane shear modulus of the carbon fiber reinforced plastics during drying and humidification at 60°C have been investigated. Fick's second law was used to approximate the dependence of the shear modulus on time, because of the dependence of mechanical properties on moisture content, which is commonly modeling by this law.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, in-plane shear modulus, diffusion, moisture content, plasticization, modeling