

УДК 531

Деформирование углепластиков под действием переменных во времени нагрузок

Русланцев А.Н.^{1.*}, Думанский А.М.^{2}**

¹Московский государственный технический университет

им. Н.Э. Баумана,

ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, 105005, Россия

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,

Малый Харитоньевский пер., 4, Москва, 101990, Россия

**andreiruslantsev@gmail.com*

***alduman@rambler.ru*

Аннотация

При эксплуатации под нагрузкой в течение длительного времени в материале могут проявляться такие реологические эффекты как ползучесть и релаксация, что может приводить к длительному разрушению, поэтому важным является анализ закономерностей деформирования полимерных композиционных материалов с учетом фактора времени. В настоящей работе рассмотрены модели, применяющиеся для описания реологических эффектов, показаны их достоинства и недостатки. Предложена модель на основе матричных уравнений теории слоистых пластин и соотношений наследственного типа, позволяющая установить зависимость деформаций от времени при переменном во времени нагружении, выполнен расчет для

углепластиков БМИ-3/3692 и КМУ-4Л. Показано хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: углепластик, наследственная механика, ползучесть, релаксация, теория слоистых пластин.

Введение

Уникальные физико-механические свойства полимерных композиционных материалов позволяют их широко применять в изделиях авиационной и ракетно-космической техники, однако необходимо решить ряд вопросов, связанных с прочностью, долговечностью и жесткостью этих материалов. Углепластики – одни из наиболее распространенных материалов, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике благодаря высокому удельному модулю и удельной прочности, но также они существенно анизотропны и имеют склонность к растрескиванию и накоплению повреждений. Некоторые технологические методы позволяют решить проблему растрескивания, в частности, распространение трещин может быть заблокировано, если высвобождение энергии деформации будет связано с высвобождением энергии вследствие проявления временных эффектов.

Важным является анализ закономерностей деформирования и разработка расчетно-экспериментальных методов прогнозирования сопротивления углепластиков деформированию и разрушению в зависимости от структурных и технологических факторов. В настоящей работе предложена модель

ползучести полимерных композиционных материалов, выполнен расчет для равнопрочного тканого углепластика БМИ-3/3692 с бисмалеимидной матрицей и для перекрестно-армированного углепластика на основе эпоксидного связующего и однонаправленной углеродной ленты КМУ-4Л со схемой укладки $\pm 20^\circ$.

В работах [1, 2] проведены экспериментальные исследования деформирования углепластиков при длительном нагружении. К перекрестно-армированным образцам заданным углом прикладывались растягивающие напряжения заданного уровня, измерение деформаций производилось в течение всего эксперимента. Установлено, что при постоянных значениях напряжениях наблюдался непрерывный рост деформации. Также экспериментально получены кривые обратной ползучести. Авторы работ аппроксимировали изменение вязкоупругой составляющей деформации степенной зависимостью: $\varepsilon = \varepsilon_0(1 + at^n)$, где $\varepsilon_0 = \sigma/E$. Данный подход характеризуется простотой, но при этом он не позволяет учитывать историю деформирования, а, следовательно, и производить расчеты при переменном во времени нагружении. Кроме того, экспериментальное определение мгновенной деформации ε_0 невозможно, поскольку невозможно мгновенное приложение напряжения заданного уровня. Увеличение скорости нагружения приводит к возникновению динамических эффектов [3].

В [4, 5] предлагается феноменологическая модель ползучести углепластика, в которой вязкоупругая составляющая деформации также

учитывается при помощи экспоненциальной зависимости. В [6, 7] экспериментально показано, что наиболее значительные временные эффекты проявляются при сдвиговом нагружении в плоскости слоя, в то время как при нагружении в направлении армирования и поперек армирования реологические эффекты пренебрежимо малы. Таким образом, можно сделать вывод, что проявление временных эффектов обусловлено возникновением касательных напряжений в плоскости слоя.

В работе [8] для аппроксимации экспериментальных зависимостей используются модели Максвелла и Фойхта. Авторами использована четырехпараметрическая модель:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-t \frac{E_2}{\eta_2}\right) \right] + \frac{\sigma}{\eta_1} t.$$

Однако данная модель не может учитывать историю нагружения и не имеет ограничений по максимальным деформациям, что накладывает ограничения на область ее применимости.

Наиболее общие случаи нагружения могут быть описаны соотношениями наследственной механики. В [9-14] для определения деформаций используются соотношения наследственной механики, имеющие следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} (1 + K^*), \text{ где } K^* \sigma(t) = \int_0^t K(t - \tau) \sigma(\tau) d\tau.$$

В качестве ядра ползучести могут быть использованы дробно-экспоненциальная функция Работнова, ядро Абеля, сумма экспоненциальных функций и пр. Кроме того, что наследственный подход является наиболее

общей формой соотношений между напряжениями и деформациями при переменных во времени нагрузках, он позволяет идентифицировать ряд взаимосвязанных функций, характеризующих материал [15]. Так, выражения для описания релаксации может быть записано как: $\sigma = E(1 - R^*)\varepsilon$, где R^* – ядро релаксации, определяемое через ядро ползучести: $(1 + K^*)(1 - R^*) = 1$,

$$R^* = \frac{K^*}{1 + K^*}.$$

Модель деформирования композиционных материалов

В статье [15] показано, что зависимость между напряжениями и деформациями может быть представлена в виде определяющего соотношения наследственного типа:

$$\gamma_{12} = \frac{1}{G_{12}^0} (1 + K^*) \tau_{12}.$$

Используя выражение для резольвенты, было получено соотношение для напряжений, вычисляемых по известной истории деформирования [5]:

$$\tau_{12} = G_{12}^0 (1 - R^*) \gamma_{12}.$$

Определяющие соотношения для слоя могут быть записаны в следующей матричной форме:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12}(1 - kR^*) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

Это же выражение в сокращенном виде записывается как

$$\{\sigma_{12}\} = [G_{12}^0 - G^0 R^*] \{\varepsilon_{12}\},$$

где $[G^0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица, позволяющая учесть эффект ползучести.

Матрица жесткости пакета определяется как:

$$[G_{xy}] = \sum [T_i][G_{12}][T_i]^T \bar{h}_i = [G_{xy}^0] - [\tilde{G}]R^*, \quad \text{где } [G_{xy}^0] = \sum [T_i][G_{12}^0][T_i]^T \bar{h}_i \text{ – матрица}$$

жесткости пакета без учета временных свойств, $[\tilde{G}] = \sum [T][G^0][T]^T \bar{h}_i$ –

поправочная матрица, $[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix}$ – матрица поворота, $s = \sin(\theta)$,

$c = \cos(\theta)$.

Матрицу податливости получаем обращением матрицы жесткости:

$$\begin{aligned} [S_{xy}] &= [G_{xy}]^{-1} = [G_{xy}^0 - \tilde{G}R^*]^{-1} = \\ &= \left[[G_{xy}^0] \left([I] - [S_{xy}^0][\tilde{G}]R^* \right) \right]^{-1} = \left([I] - [S_{xy}^0][\tilde{G}]R^* \right)^{-1} [S_{xy}^0], \end{aligned}$$

где $[S_{xy}^0] = [G_{xy}^0]^{-1}$ – матрица податливости пакета без учета временных свойств.

Обозначим $[A] = [S][\tilde{G}]$. Проведем диагонализацию матрицы $[A]$:

$[A] = [Q][D][Q]^{-1}$, где $[D]$ – диагональная матрица, составленная из собственных чисел λ_i , а $[Q]$ – матрица, составленная из собственных векторов-столбцов.

После преобразований окончательно, с учетом свойств резольвентных операторов, имеем:

$$[S_{xy}^*] = [Q] \text{diag} (1 - \lambda_i R^* (\mu - \lambda_i)) [Q]^{-1} [S_{xy}^0]$$

Определяющие соотношения для пакета записываются в следующем виде:

$$\{\varepsilon(t)\} = [S_{xy}^*] \{\sigma_{xy}(t)\},$$

где $[S_{xy}^*]$ – матрица податливости, $\sigma_{xy}(t)$ – функция, описывающая историю нагружения.

Для выявления временных эффектов были проведены испытания на ползучесть и релаксацию образцов из углепластиков БМИ-3/3692 со схемой армирования $\pm 45^\circ$ и КМУ-4Л со схемой армирования $\pm 20^\circ$. На образцы были наклеены тензорезисторы для регистрации продольных и поперечных деформаций.

Механические характеристики углепластика БМИ-3/3692 были определены в [17]. $E_1 = 84$ ГПа, $E_2 = 80$ ГПа, $\nu_{12} = 0.04$. $G_{12} = 7.5$ ГПа. На диаграммах деформирования, представленных в [17] видно, что для образцов с углами армирования 30° и 45° проявляется нелинейность и гистерезис. Это может быть объяснено временными эффектами.

Для выявления временных эффектов были испытаны пять образцов со схемой армирования $\pm 45^\circ$. Первый и второй образцы были нагружены за 15 секунд до 150 МПа, после чего выдерживались при заданном уровне напряжений в течение 6000 секунд, третий образец был нагружен до 175 МПа и разрушился примерно через 60с после начала эксперимента, четвертый и пятый

образцы были подвергнуты нагружению и разгрузке с различными скоростями и максимальными значениями напряжений.

По предложенной модели были произведены расчеты для углепластика БМИ-3/3692. В качестве ядра ползучести было выбрано ядро Абеля:

$K(t) = \frac{kt^\alpha}{\Gamma(1+\alpha)}$. Резольвентой по отношению к ядру Абеля является дробно-

экспоненциальная функция Работнова: $\mathcal{E}_\alpha(\beta, t) = kt^\alpha \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\beta^n t^{n(1+\alpha)}}{\Gamma[(n+1)(1+\alpha)]}$.

Параметры ядра определялись при помощи метода наименьших квадратов. Численно был определен минимум невязки расчетных и экспериментальных данных:

$$\Phi = \sum \left(\varepsilon^p - \varepsilon^{\mathcal{E}} \right)^2 \rightarrow \min .$$

Были получены следующие значения параметров: $\alpha=-0.7$, $\beta=-0.05$, $k=800$.

Расчетные кривые и экспериментальные данные показаны на рис. 1-5. Сплошной линией показаны расчетные значения деформаций, маркерами – экспериментальные.

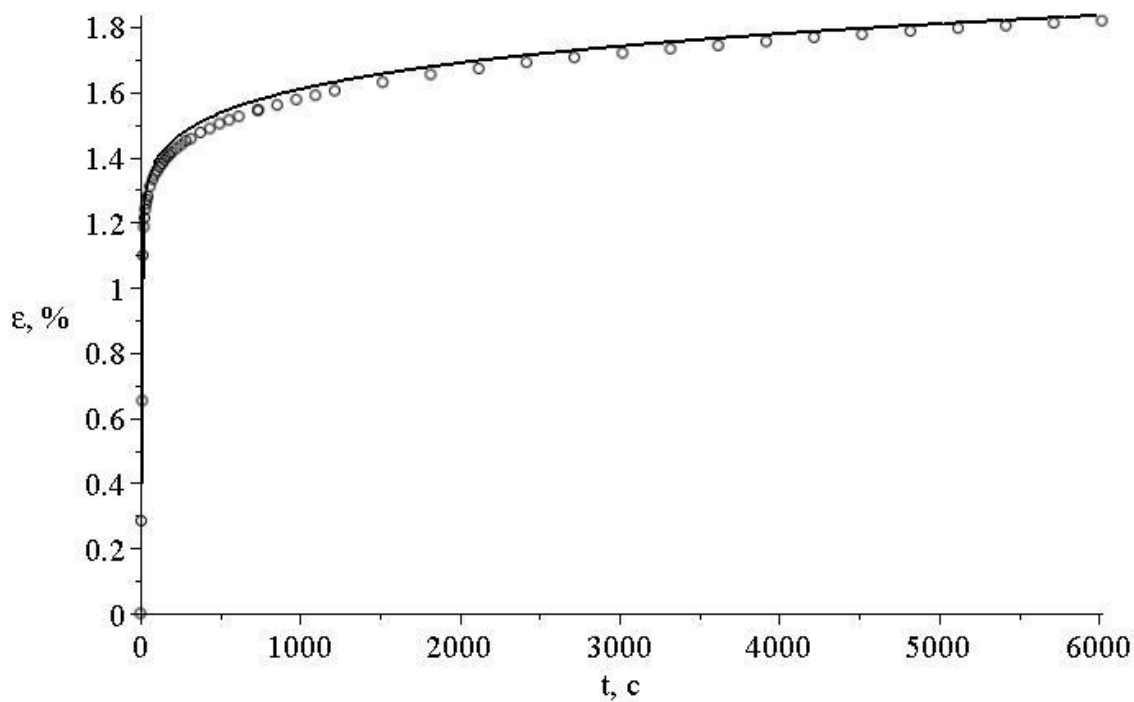


Рис. 1. Кривая ползучести углепластика БМИ-3/3692. Маркерами показаны экспериментальные данные, линией – расчет.

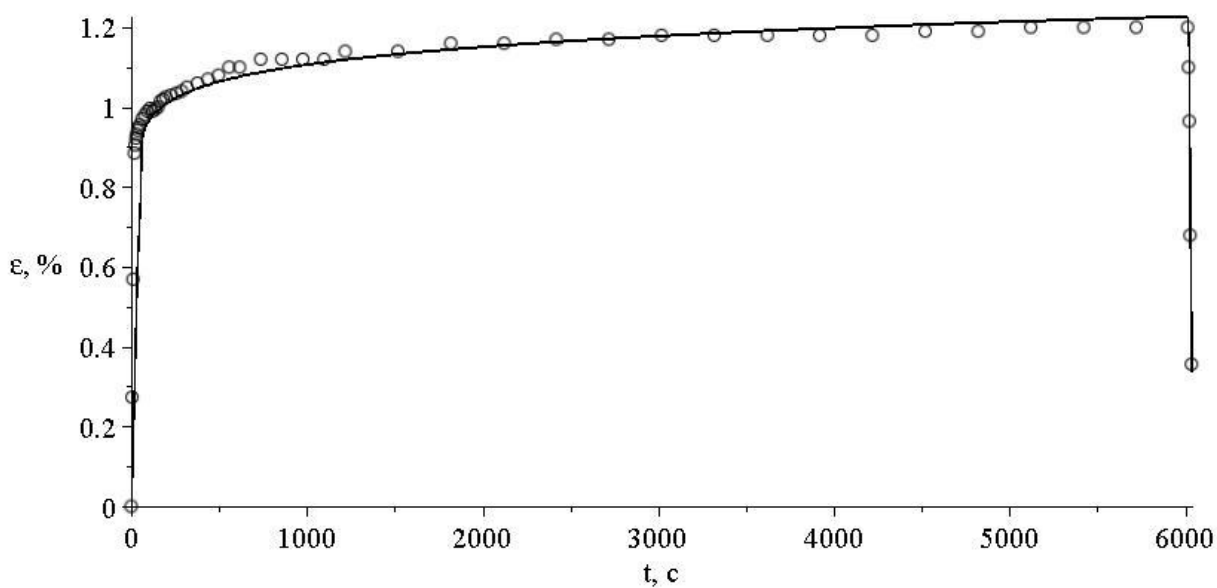


Рис. 2. Кривая ползучести углепластика БМИ-3/3692. Маркерами показаны экспериментальные данные, линией – расчет.

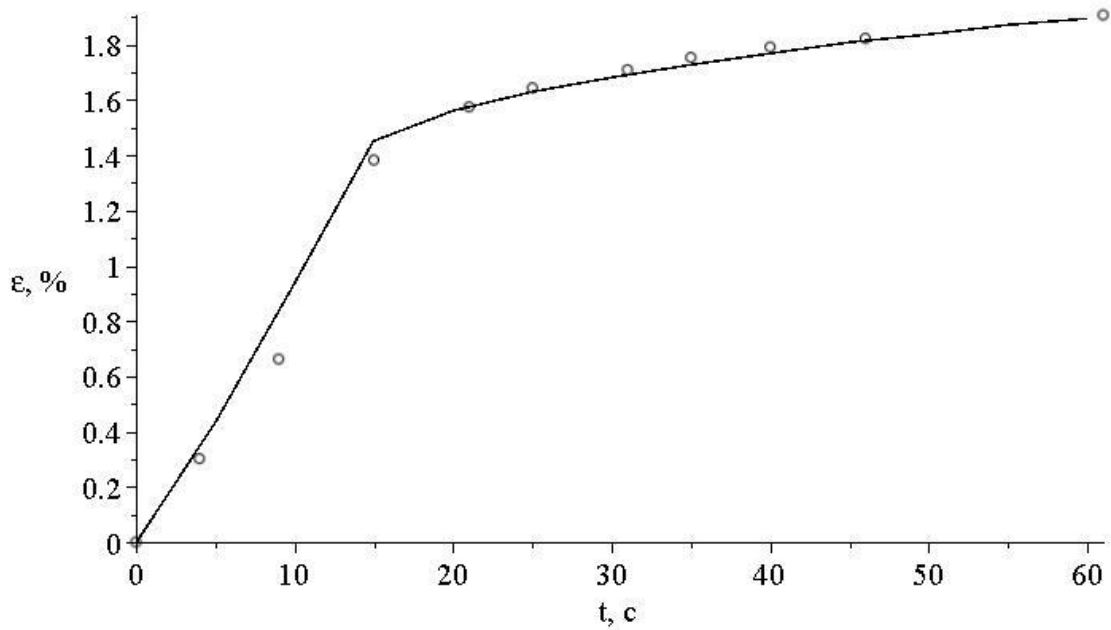


Рис. 3. Кривая ползучести углепластика БМИ-3/3692. Маркерами показаны экспериментальные данные, линией – расчет.

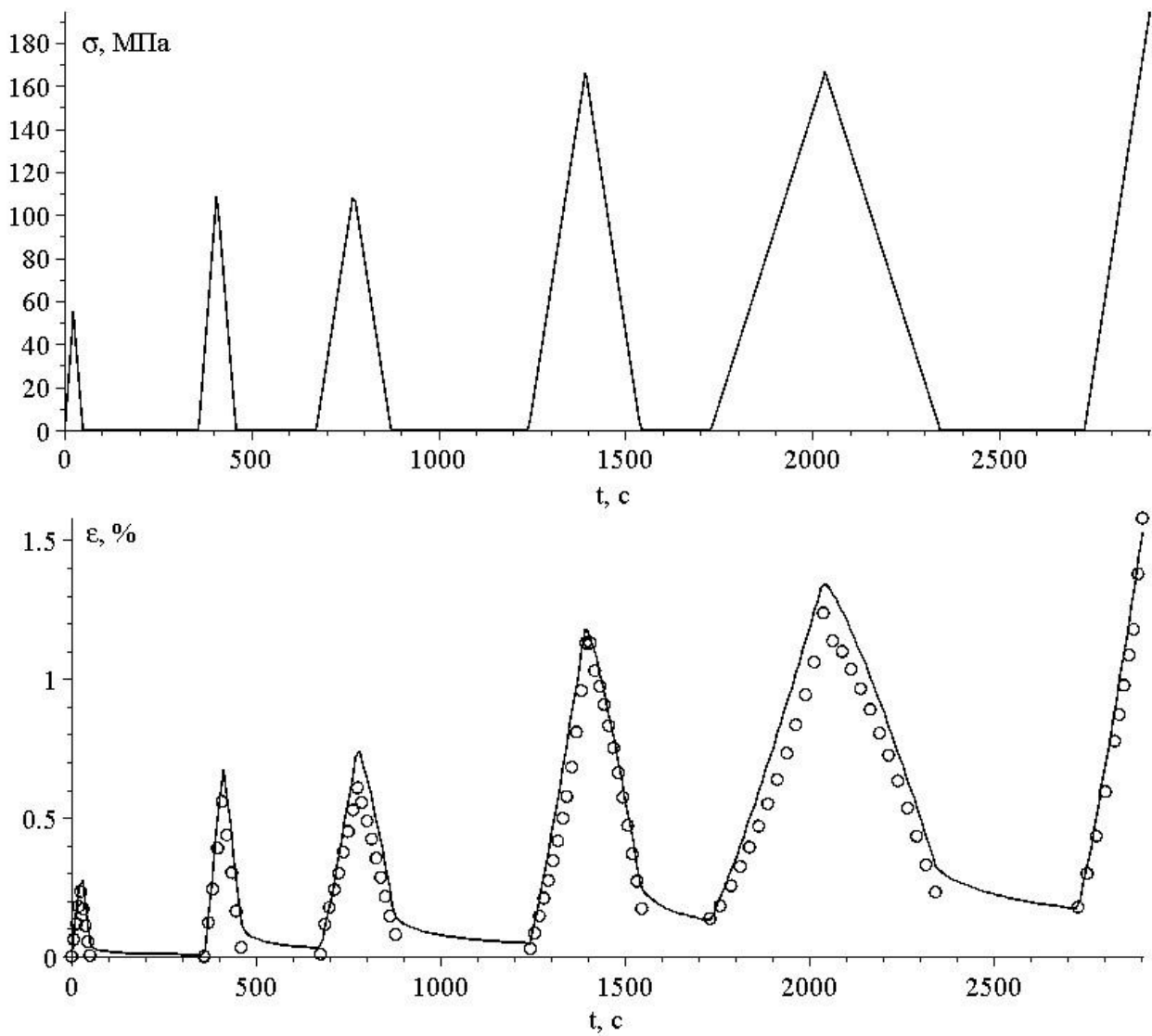


Рис. 4. Зависимости напряжений и деформаций от времени для углепластика БМИ-3/3692. Маркерами показаны экспериментальные данные, линией – расчет.

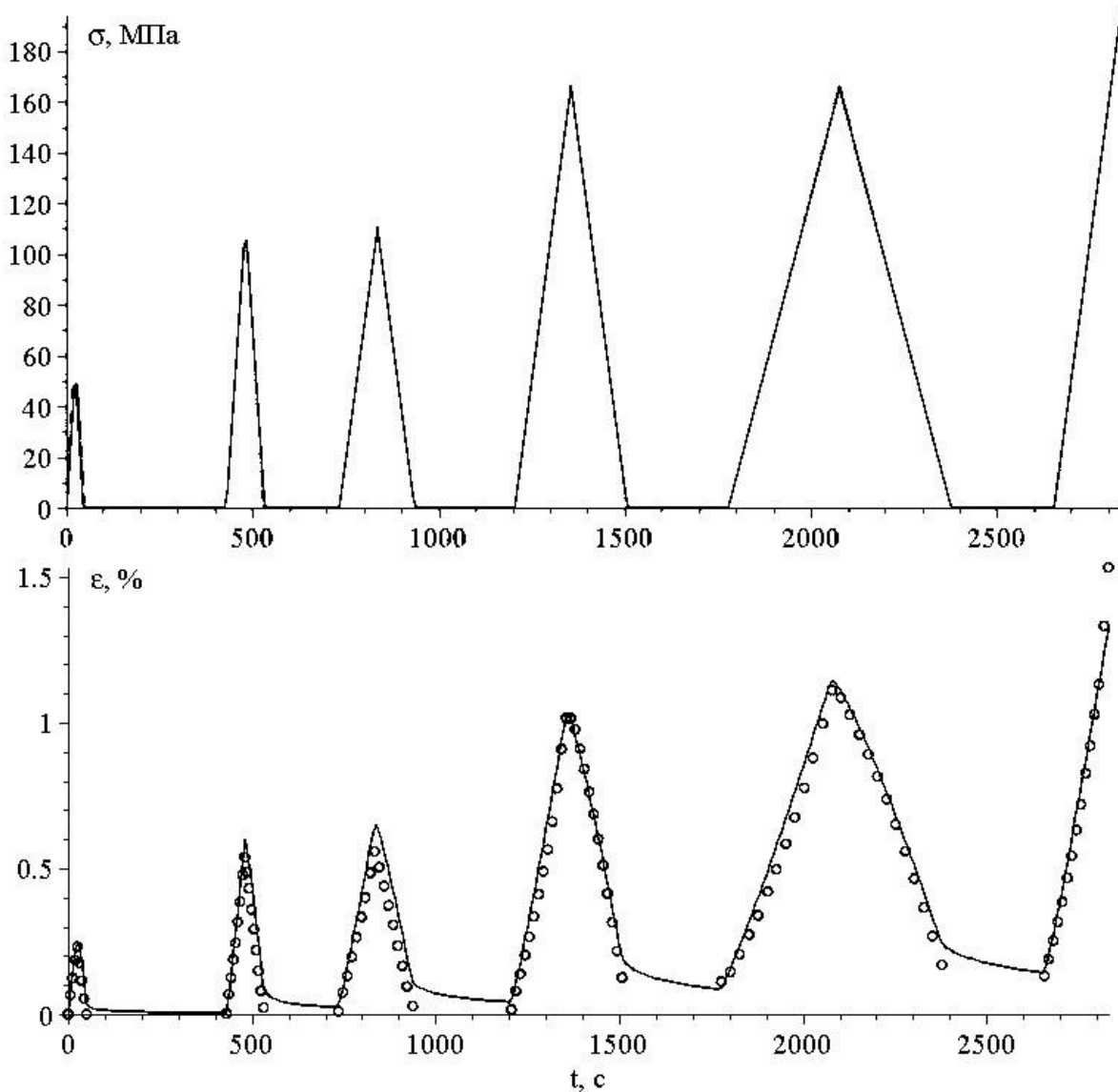


Рис. 5. Зависимости напряжений и деформаций от времени для углепластика БМИ-3/3692. Маркерами показаны экспериментальные данные, линией – расчет.

Можно видеть, что диаграммы напряжений и деформаций не подобны, что вызвано влиянием реологических свойств.

Для перекрестно армированных образцов из углепластика КМУ-4Л упругие характеристики монослоя были определены в [18]: $E_1 = 150$ ГПа, $E_2 = 4$ ГПа, $\nu_{12} = 0.32$. $G_{12} = 3.3$ ГПа.

При испытаниях на ползучесть образцы со схемой армирования $[\pm 20^\circ]_{2s}$ нагружались до напряжений 300 МПа за 15 секунд, после чего производилась выдержка в течение двух часов, при этом велась регистрация деформаций. При испытаниях на релаксацию образец за 15 секунд нагружался до уровня деформаций 0.34%, что соответствует напряжениям величиной 300 МПа, после чего также в течение двух часов производилась выдержка с регистрацией напряжений.

Параметры ядра также определялись численно методом наименьших квадратов: $\alpha = -0.8$, $\beta = -0.05$, $k = 150$. Расчетные кривые и экспериментальные данные показаны на рис. 6, 7. Сплошной линией показаны расчетные значения деформаций, маркерами – экспериментальные.

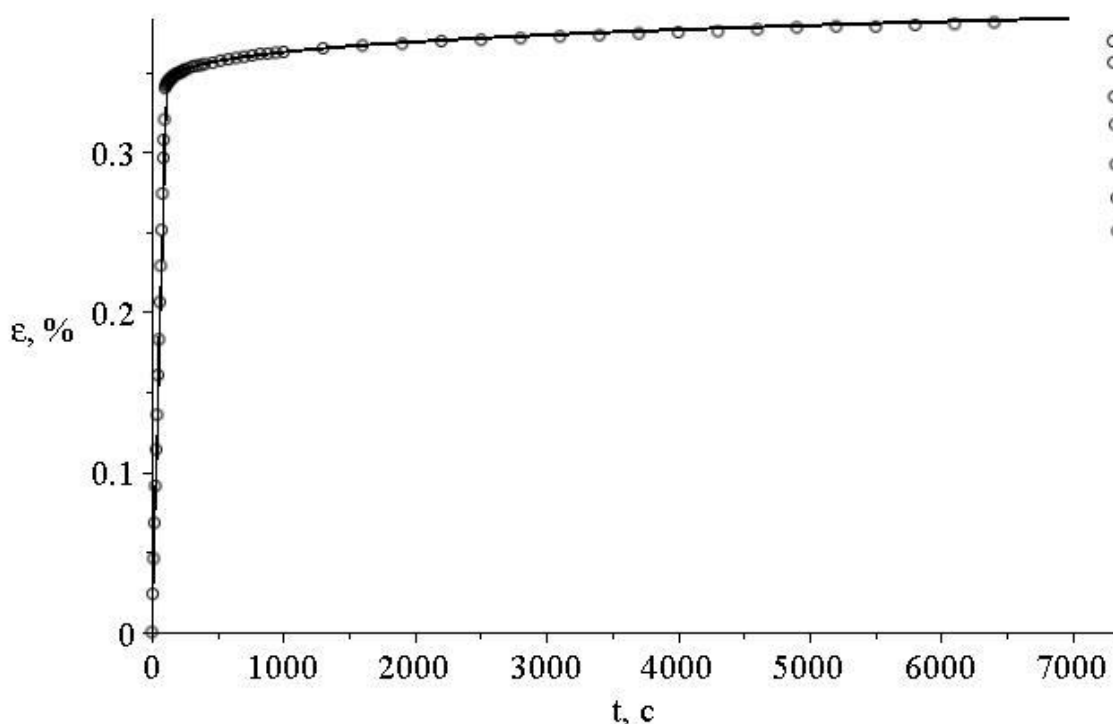


Рис. 6. Кривая ползучести углепластика КМУ-4Л. Маркерами показаны экспериментальные данные, линией – расчет.

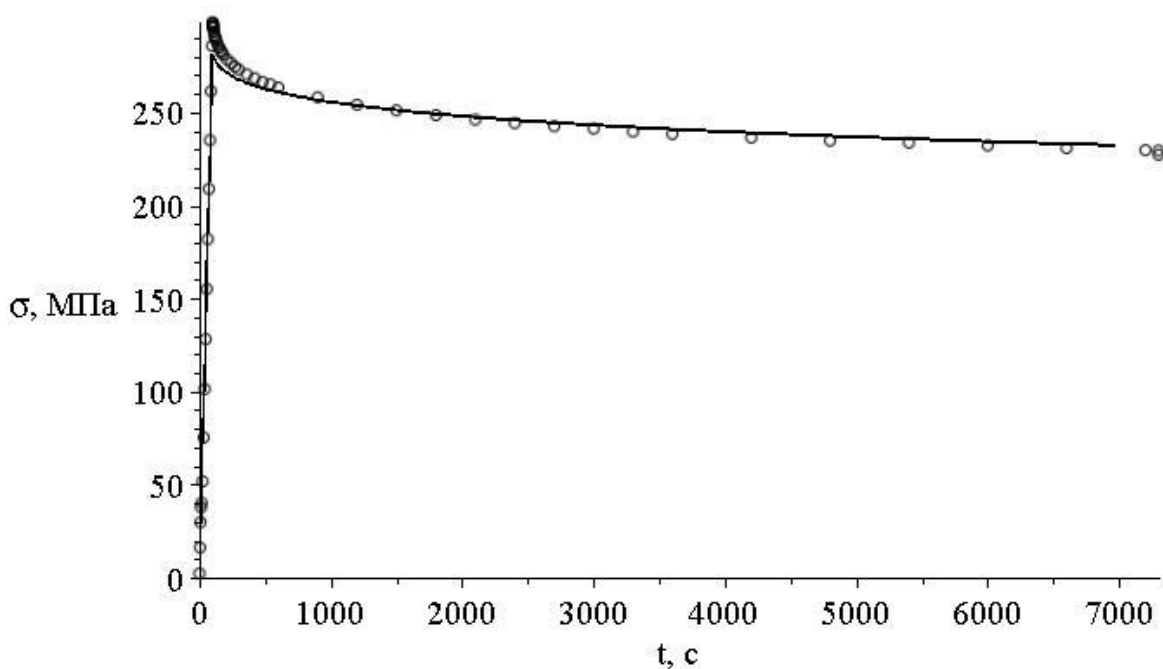


Рис. 7. Кривая релаксации углепластика КМУ-4Л. Маркерами показаны экспериментальные данные, линией – расчет.

На представленных графиках можно видеть хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных как для пластиков на основе ткани, так и для материалов, армированных однонаправленной лентой.

Выводы

Предложена модель наследственного типа, позволяющая описывать временные эффекты при деформировании полимерных композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами.

При помощи данной модели выполнен расчет для образцов углепластиков КМУ-4 и БМИ-3/3692, показано хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными.

Данная модель может быть использована для расчета напряженно-деформированного состояния композитных конструкций при длительном деформировании.

Библиографический список

1. Schapery R.A. Viscoelastic behavior and analysis of composite materials // *Mechanics of Composite Materials*, 1974, vol. 2, pp. 86 - 168.
2. Deng S., Li X., Weitsman Y. Time-Dependent Deformation of Stitched T300 Mat / Urethane 420 IMR Cross-Ply Composite Laminates // *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2003, no. 7, pp. 41 - 69.
3. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. - М.: Высшая школа, 1976. - 278 с.
4. Kawai M., Masuko Y., Sagawa T. Off-axis tensile creep rupture of unidirectional CFRP laminates at elevated temperature // *Composites: Part A*, 2006, no. 37, pp. 257 - 269.
5. Yao Z., Wua D., Chen C., Zhang M. Creep behavior of polyurethane nanocomposites with carbon nanotubes // *Composites: Part A*, 2013, no. 50, pp. 65 - 72.
6. Yahyaei-Moayyed M., Taheri F. Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams // *Composite Structures*, 2011, no. 93, pp. 616 - 628.

7. Sokolov E.A. The possibilities of predicting the creep properties of the laminate organoplastic unidirectional fiber reinforced materials // *Mechanics of Composite Materials*, 1980, no. 1, pp. 142 - 147.
8. Du Y., Yan N., Kortschot M. An experimental study of creep behavior of lightweight natural fiber-reinforced polymer composite / honeycomb core sandwich panels // *Composite Structures*, 2013, no. 106, pp. 160 - 166.
9. Работнов Ю.Н., Паперник А.Х., Степанычев Е.И. Нелинейная ползучесть стеклопластика ТС8/3-250 // *Механика полимеров*. 1971. № 3. С. 391 - 397.
10. Работнов Ю.Н., Паперник А.Х., Степанычев Е.И. О связи характеристик ползучести стеклопластиков с кривой мгновенного деформирования // *Механика полимеров*. 1974. № 4. С. 624 - 628.
11. Balevicius R., Marciukaitis G. Linear and Non-linear Creep models for a multi-layered concrete composite // *Archives of civil and mechanical engineering*, 2013, no. 13, pp. 472 – 490.
12. Янсон Ю.О., Дмитриенко И.П., Зелин В.И. Прогнозирование деформаций ползучести однонаправленно армированного органопластика по результатам квазистатических испытаний // *Механика композитных материалов*. 1983. № 4. С. 610 - 613.
13. Максимов Р.Д., Плуме Э.З. Прогнозирование ползучести однонаправленного армированного пластика с терморелогически простыми структурными компонентами // *Механика композитных материалов*. 1982. № 6. С. 1081 - 1089.

14. Плуме Э.З. Сравнительный анализ ползучести однонаправленных композитов, армированных волокнами различного типа // Механика композитных материалов. 1985. № 3. С. 431 - 436.
15. Хохлов А.В. Кривые длительной прочности, порождаемые линейной теорией вязкоупругости в сочетании с критериями разрушения, учитывающими историю деформирования // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75559>
16. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. - М.: Наука, 1977. - 384 с.
17. Ruslantsev A.N., Portnova Ya.M., Tairova L.P., Dumansky A.M. Analysis of mechanical properties anisotropy of nanomodified carbon fiber-reinforced woven composites // IOP Conference Series: Material Science and Engineering (MSE), 2016, vol. 153, DOI: 10.1088/1757-899.
18. Думанский А.М., Русланцев А.Н., Карасева А.А. Расчет нелинейного деформирования перекрестно армированных углепластиков // Материалы IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012), Алушта, 25-31 мая 2012, Изд-во МАИ, С. 363 - 365.