

УДК 539.3

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЛЕНОЧНО-ТКАНЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ПОДВЕРГАЕМОГО ВОЗДЕЙСТВИЮ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

*Р.А. Каюмов, А.Р. Мангушева,
А.Т. Мухаметшин, А.М. Сулейманов*

Аннотация

Приведена методика отыскания напряженно-деформированного состояния и оценки долговечности пленочно-тканевого композиционного материала с учетом ползучести, накопления микрповреждений и фотодеструкции. Исследованы зависимости напряженно-деформированного состояния и долговечности представительного элемента пленочно-тканевого композиционного материала от его исходных геометрических и механических характеристик. Построены предельные кривые долговечности в пространстве усилий растяжения.

Ключевые слова: напряжения, деформации, долговечность, ползучесть, фотодеструкция.

Введение

При проектировании элементов конструкций и сооружений из композиционных материалов (КМ) к важнейшим относятся задачи оценки их жесткости, прочности и долговечности с учетом деструкции материала под воздействием эксплуатационных факторов – силовых воздействий, температурных перепадов, а также агрессивных сред и различных физических полей. К наиболее агрессивным из климатических факторов для полимерных материалов относится солнечная ультрафиолетовая радиация (УФР). Большие дозы УФР приводят к деструкции материала и понижению его прочности, особенно при наличии напряженного состояния.

Для оценки долговечности пленочно-тканевых материалов и конструкций из них необходимо знать напряженно-деформированное состояние (НДС) компонент материала и законы их старения с учетом влияния на свойства композитных материалов как НДС, так и УФР. Очевидно, из-за малости размеров поперечного сечения материала (0.8–3 мм) решить эту проблему только методами и средствами натурной тензометрии или другими экспериментальными методами не представляется возможным. Для расчета таких типов материалов удобно использовать методы математического моделирования на ЭВМ, с помощью которых появляется возможность варьировать параметры структурных составляющих. Создание соответствующей модели предполагает знание геометрических параметров элементарной ячейки, физико-механических характеристик структурных составляющих и законы их изменения под действием внешних факторов.

В работах [1, 2] предложены варианты определяющих соотношений процесса деформирования и фотодеструкции пленочного композиционного материала и рассмотрена плоская задача о долговечности представительного элемента этого материала (фактически для материала с искривленными армирующими слоями

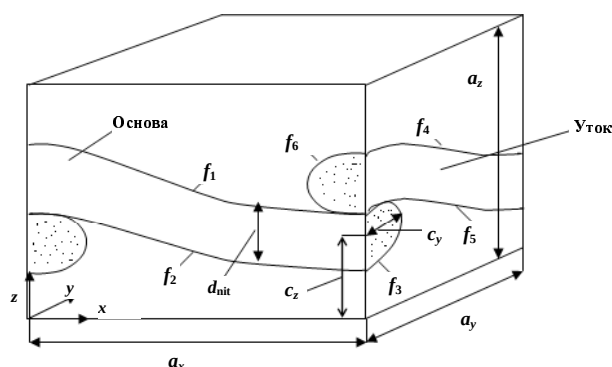


Рис. 1. Геометрия представительной ячейки пленочно-тканевого композиционного материала

и поперечными прямолинейными волокнами). В настоящей работе рассматривается трехмерная модель ячейки композита на основе ткани. Она содержит большее количество конструктивных характеристик и расширяет спектр варьируемых параметров при анализе их влияния на долговечность пленочно-тканевого композиционного материала (ПТКМ).

1. Структура пленочно-тканевого композиционного материала

Рассмотрим пленочно-тканевый композиционный материал, представляющий собой ткань из высокопрочных синтетических нитей и пленочного полимерного покрытия. Последнее служит обычно для защиты армирующей основы от воздействия атмосферных факторов и придания воздухонепроницаемости материалу. Регулярность структуры ПТКМ позволяет выделить одну его ячейку, образованную двумя соседними парами нитей (основы и утка) (рис. 1). Геометрию нитей аппроксимируем косинусоидами, а их сечения – эллипсами. Функции f_1 , f_2 , f_3 выделяют область, занимаемую нитью ткани, называемую основой. Аналогично f_4 , f_5 , f_6 – функции, выделяющие область, занимаемую нитью ткани, называемую утком; d_{nit} – толщина нити, c_y – горизонтальная полуось эллипса, c_z – расстояние от нижней грани до его центра, a_x , a_y , a_z – размеры сторон ячейки.

2. Основные соотношения для построения структурной модели пленочно-тканевого композиционного материала

Приведем, следуя [1], структуры определяющих соотношений. Под воздействием внешних несиловых агрессивных воздействий, в частности ультрафиолетового облучения, происходят фазовые превращения и изменения механических свойств полимерной матрицы ПТКМ, которые назовем деструкцией материала (от воздействия ультрафиолета – его фотодеструкцией).

При этом происходит диффузия деструкции в толщу материала на некоторый слой высоты h (этот процесс идет со стороны поверхности, подверженной облучению). В связи с этим используем скалярный параметр W – параметр фотодеструкции. Считается, что он пропорционален интенсивности ультрафиолетового облучения γ . Для него в качестве определяющего соотношения принимается эволюционное уравнение вида:

$$\frac{dW}{dt} = \gamma U(\sigma, \omega, W, h), \quad (1)$$

где ω – некоторый параметр состояния материала, σ – вектор, состоящий из компонент тензора напряжений.

Принимая для простоты, что поверхность облучения представляет собой плоскость, процесс проникновения фотодеструкции вглубь материала будем описывать уравнением, аналогичным соотношению (1):

$$\frac{dh}{dt} = \gamma R(\sigma, \omega, W, h).$$

Введем в качестве параметра состояния параметр поврежденности ω [2], который описывает накопление в материале дефектов типа микротрещин, микропор. Для него также используется определяющее соотношение в дифференциальной форме:

$$\frac{d\omega}{dt} = \Omega(\sigma, \omega, W). \quad (2)$$

Условие прочности материала в [1] предлагалось описывать уравнением вида:

$$f(\sigma, \varepsilon, \omega, W, g) = 1.$$

Здесь g – вектор структурных параметров, включающий в себя, в частности, предел прочности.

Далее приведем упрощенные соотношения для стареющего ПТКМ [1]. Кинетическое уравнение относительно ω было принято в следующей форме:

$$\frac{d\omega}{dt} = B \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^k \frac{1}{(1-\omega)^q} \left[1 + \left(\frac{W}{u} \right) \right]^\chi. \quad (3)$$

Здесь σ_i – интенсивность напряжений, а постоянные B , k , q , χ , u , σ_0 нужно получать из экспериментов.

Для параметра W , характеризующего уровень фотодеструкции, проводилась аппроксимация по области рассматриваемой ячейки, содержащая коэффициенты, удовлетворяющие соотношениям вида (1). Для этого был введен параметр $W_0(x, y)$ – уровень фотодеструкции на поверхности $z = a_z$, подвергаемой облучению, а закон распределения степени фотодеструкции по глубине в расчетах для простоты считался линейным:

$$\begin{cases} W = W_0 \left(1 - \frac{a_z - z}{h} \right), & z \geq (a_z - h), \\ W = 0, & z < (a_z - h). \end{cases}$$

Относительно h и параметра W_0 использовались эволюционные уравнения в виде:

$$\begin{aligned} \dot{W}_0 &= \gamma \gamma_u \frac{\left(1 + \frac{\sigma_{i0}}{\sigma_{i00}} \right)^m}{\left(1 + \frac{W_0}{W_1} \right)^n}, \quad m, n > 0, \\ \dot{h} &= \frac{\gamma_h \gamma \left[\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_h} \right)^\mu + 1 \right] W_0^b}{\left[1 + \frac{h_w}{h_0} \right]^p \left[1 + \frac{W_0}{W_2} \right]^\eta}, \end{aligned}$$

где W_1 , W_2 , n , m , γ_u , σ_{i00} , σ_h , γ_h , h_0 , μ , p , η , b – константы, определяемые из экспериментов, σ_{i0} – интенсивность напряжений на поверхности $z = a_z$.

Критерий разрушения принимался, следуя работам Ю.Н. Работнова, в упрощенном виде:

$$\omega = 1, \quad t = t^*,$$

где t^* – время, при котором наступает разрушение. Это время будем называть для краткости долговечностью, или критическим временем.

3. Конечно-элементная модель

Для дискретизации области применялся восьмиузловой изопараметрический пространственный конечный элемент. Далее основные соотношения приводятся в векторной форме.

Для анализа напряженно-деформированного состояния используется принцип виртуальной работы в приращениях

$$\iiint_V \{\Delta\sigma\}^T \delta\{\Delta\hat{\varepsilon}\} dV = \iint_{S_\sigma} \{\Delta P\}^T \delta\{\Delta u\} dS.$$

Полная деформация складывается из упругой деформации, деформации ползучести и деформации, возникающей от наличия поврежденности:

$$\{\Delta\hat{\varepsilon}\} = \{\Delta\varepsilon^e\} + \{\Delta\varepsilon^c\} + \{\Delta\varepsilon^\omega\},$$

где $\{\Delta\hat{\varepsilon}\}$, $\{\Delta\varepsilon^e\}$ – векторы приращений полной и упругой частей деформации, $\{\Delta\varepsilon^c\}$ – вектор приращения деформации ползучести, $\{\Delta\varepsilon^\omega\}$ – вектор приращения деформации, возникающей от наличия поврежденности.

Каждая фаза для простоты считалась изотропной, закон упругости принимался линейным:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^e\}.$$

Деформация ползучести и деформация, отвечающая за накопление в теле микрповреждений, в общем случае зависят от многих параметров процесса:

$$\{\Delta\dot{\varepsilon}^c\} = \{\varphi_1(\sigma_i, W, \varepsilon^c, \omega, T)\},$$

$$\{\Delta\dot{\varepsilon}^\omega\} = \{\varphi_2(\sigma_i, W, \varepsilon^\omega, \omega, T)\},$$

где T – температура. Поскольку экспериментальное определение этих зависимостей – очень сложная задача, то принимались некоторые упрощающие предположения. Во-первых, с целью уменьшения количества механических характеристик, требуемых для описания законов деформирования фаз материала, принимается гипотеза Качанова [3] (суть ее состоит в том, что накопление микрповреждений не влияет на процесс ползучести). Хотя эта гипотеза справедлива в случае невысокой концентрации микродефектов в материале, однако время деформирования тела при высокой концентрации значительно меньше времени деформирования при низких концентрациях микродефектов. Поскольку, как видно из (3), скорость накопления микрповреждений сильно возрастает при больших ω , то можно в первом приближении ограничиться этой гипотезой. Во-вторых, температура считалась равной некоторой среднегодовой величине с некоторым поправочным коэффициентом. Это предположение безусловно справедливо только для больших времен эксплуатации изделия. Кроме того, существуют методы определения величины этой среднегодовой температуры из условий энергетической эквивалентности (см., например, [4]). Соотношение для скорости деформации ползучести по теории течения принималось в виде [5]:

$$\{\Delta\dot{\varepsilon}^c\} = C(\sigma_i)[D^{-1}]\{\sigma\}, \quad C(\sigma_i) = (s_0 + s_1\sigma_i)^\xi,$$

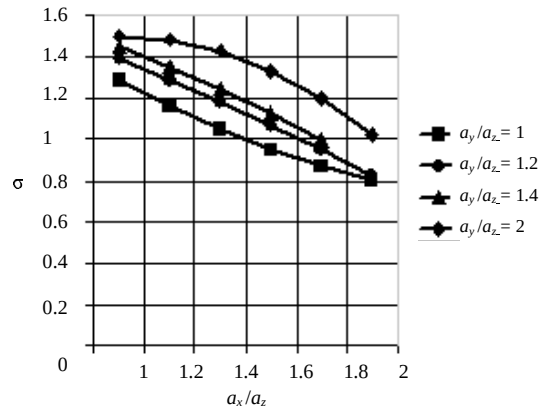


Рис. 2. Зависимость максимальной интенсивности напряжений σ_i (МПа) от отношения a_x/a_z в упругой постановке

где $[D^{-1}]$ – матрица, обратная матрице упругих постоянных для трехмерного деформированного состояния, s_0 , s_1 , ξ – скалярные механические характеристики.

Для скорости деформации, возникающей от наличия поврежденности, использовалось аналогичное соотношение:

$$\{\Delta \dot{\varepsilon}^\omega\} = \zeta [D^{-1}] \{\sigma\} \omega^k,$$

где k , ζ – скалярные механические характеристики.

4. Численные эксперименты

Структурно-имитационная модель представительного элемента пленочно-тканевого композиционного материала позволяет проводить численные эксперименты в широком диапазоне варьирования геометрических и механических характеристик ПТКМ.

Геометрические параметры (см. рис. 1) были заданы в миллиметрах и принимали следующие значения: $d_{\text{nit}} = 0.4$, $c_z = 0.4$, $c_y = 0.2$, $a_z = 1$. Были использованы следующие упругие характеристики. Модули упругости: $E_{\text{osn}} = 50$ МПа, $E_{\text{mat}} = 1$ МПа, $E_{\text{utok}} = 50$ МПа; коэффициенты Пуассона: $\nu_{\text{osn}} = \nu_{\text{mat}} = \nu_{\text{utok}} = 0.4$.

На левом торце были закреплены перемещения по горизонтали, а в левой нижней точке – перемещения по вертикали. На правом торце по оси x были заданы перемещения, на переднем и заднем торцах перемещение принималось равным нулю. Эти граничные условия представляют собой условие периодичности деформирования представительной ячейки, изображенной на рис. 1.

Поскольку на долговечность композита важнейшее влияние оказывает напряженное состояние матрицы (разрушение которой приводит к оголению нитей и их быстрой деструкции под воздействием климатических факторов), то сначала было изучено изменение максимальной интенсивности напряжения в матрице (в точке, находящейся в начале координат) в зависимости от изменения геометрических характеристик ячейки (рис. 2, 3).

Анализ этих зависимостей показал, что при увеличении шага плетения основы a_x интенсивность напряжения падает, а при увеличении шага плетения утка a_y – возрастает.

Были приведены численные эксперименты с целью анализа взаимного влияния параметров представительного элемента на его долговечность. На рис. 3 показано

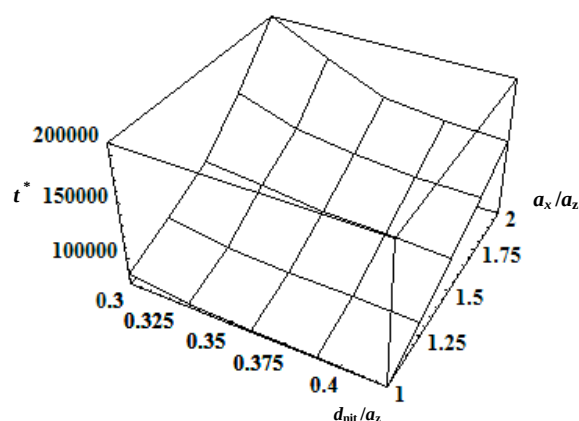


Рис. 3. Изменение долговечности t^* (ч) в зависимости от толщины нити $d_{\text{нит}}$ и от изменения a_x ; $B = 0.000025 \text{ ч}^{-1}$

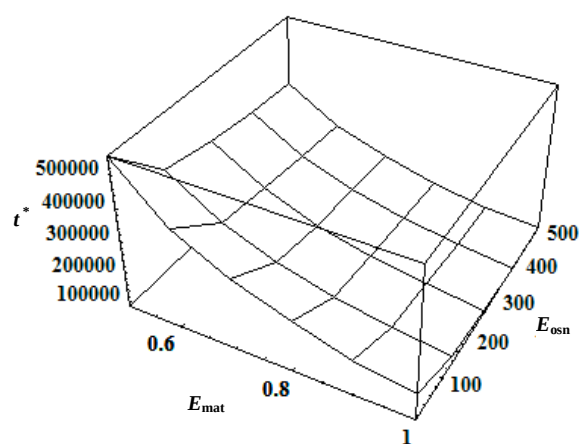


Рис. 4. Изменение долговечности ПТКМ t^* (ч) в зависимости от жесткости матрицы E_{mat} и жесткости нитей $E_{\text{уток}} = E_{\text{осн}}$ (МПа)

влияние на критическое время t^* изменения толщины нити $d_{\text{нит}}$ в зависимости от шага плетения основы a_x . Из рисунка видно, что степень снижения долговечности при увеличении толщины нити существенно зависит от шага плетения.

Поскольку за счет добавок можно варьировать механические свойства матрицы и нитей, то были проведены численные эксперименты и построены зависимости критического времени от механических характеристик ПТКМ.

На рис. 4 показана зависимость долговечности от механических свойств материала, а именно изменение долговечности ПТКМ в зависимости от соотношения жесткости основы и матрицы. Принимались следующие значения коэффициентов: $\gamma = 1$, $n = 1$, $m = 0.5$, $\gamma_u = 0.01$, $W_1 = 1$. Видно, что увеличение модуля упругости матрицы и нитей при заданном уровне деформаций, как и ожидалось, ведет к снижению долговечности ввиду повышения уровня напряженного состояния при заданном значении деформации ячейки.

В геометрически линейной постановке может быть рассмотрена задача построения предельных кривых заданной долговечности ПТКМ при двухосном растяжении. На рис. 5 приведены предельные кривые в пространстве усилий растяжения P_x и P_y для разных толщин нити $d_{\text{нит}}$.

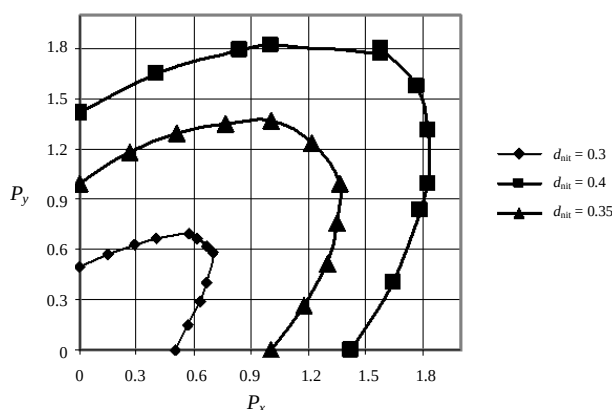


Рис. 5. Предельные кривые в осях суммарных сил растяжения P_x и P_y (Н), приводящих к потере прочности ячейки при $t^* = 230$ ч, $B = 0.025$ ч $^{-1}$

Закключение

Создана конечно-элементная модель ячейки пленочно-тканевого композиционного материала для анализа процесса ее деформирования с учетом деградации фаз композита под действием солнечной ультрафиолетовой радиации. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния и критического времени безопасной эксплуатации композита. Показано, что в случае одноосного растяжения ячейки (при ограничении деформации в ортогональном направлении) с увеличением шага плетения в направлении растягивающих сил максимальная интенсивность напряжений падает, а долговечность возрастает, и наоборот, интенсивность напряжения повышается при увеличении шага плетения в ортогональном направлении, а долговечность уменьшается. Анализ предельных кривых долговечности показал, что при двусосном растяжении долговечность ячейки выше, чем при одноосным.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № 2432 от 19.11.2009).

Summary

R.A. Kayumov, A.R. Mangusheva, A.T. Mukhametshin, A.M. Suleimanov. On the Definition of Fabric Composite Material Durability under Solar Radiation.

The paper presents a method of finding the stress-strain state and the durability of fabric composite material with taking into account the creep, microdamage accumulation and photodestruction. Dependences of the stress-strain state and durability of a representative element on its initial geometrical and mechanical characteristics are investigated. Durability limit curves in space of stretching force are constructed.

Key words: stress, strain, durability, creep, photodestruction.

Литература

1. Каюмов Р.А., Сулейманов А.М., Мухамедова И.З. Моделирование поведения пленочно-тканевого материала при воздействии эксплуатационных факторов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2005. – Т. 11, № 4. – С. 519–530.

2. Каюмов Р.А., Куприянов В.Н., Мухамедова И.З., Сулейманов А.М., Шакирова А.М. Деформирование представительной ячейки пленочно-тканевого композита при конечных перемещениях // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т. 13, № 2. – С. 165–173.
3. Качанов Л.М. Основы механики разрушения – М.: Наука, 1974 – 312 с.
4. Сулейманов А.М., Еремин Н.Ф., Куприянов В.Н. Старение пленочно-тканевых материалов в двухосном напряженном состоянии // Работоспособность композиционных строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов. – Казань: КХТИ, 1985. – С. 65–67.
5. Алексеев К.П., Каюмов Р.А., Мухамедова И.З., Терезулов И.Г. Экспериментальное исследование ползучести композиционных материалов на трубчатых образцах из органо-пластика // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2004. – Т. 10, № 2. – С. 199–210.
6. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. – М.: Высш. шк., 1985. – 392 с.
7. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
8. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
9. Голованов А.И., Бережной Д.В. Метод конечных элементов в механике деформируемых твердых тел. – Казань: ДАС, 2001. – 301 с.

Поступила в редакцию
23.12.09

Каюмов Рашит Абдулхакович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и основ теории упругости Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

E-mail: kayumov@rambler.ru

Мангушева Алина Раисовна – аспирант кафедры сопротивления материалов и основ теории упругости Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

E-mail: alinamr@mail.ru

Мухаметшин Айрат Тагирович – аспирант кафедры сопротивления материалов и основ теории упругости Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

E-mail: airat-mat@mail.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович – доктор технических наук, проректор по НИР Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

E-mail: sulejmanov@ksaba.ru