

УДК 539.3

ОПИСАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТКАНОГО КОМПОЗИТА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ

© 2013 г.

Н.Н. Берендеев

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

n_n_beren@mm.unn.ru

Поступила в редакцию 28.02.2013

Предложена структурная модель для описания поведения гибкого тканого композита. Вводилось предположение о том, что процесс деформирования тканого композита состоит из трех стадий, и особенности его определяются накоплением повреждений. Проведенное сравнение с экспериментальными данными при растяжении по основе и по утку показало хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов.

Ключевые слова: гибкий тканый композит, повреждение, модель, диаграмма деформирования.

Введение

Гибкие тканые композиты являются одними из первых и наиболее широко применяемых композиционных материалов. Данная особенность обусловлена тем, что указанный тип материалов в отличие от других имеет достаточно равномерно распределенную в плоскости структуру армирования, сохраняет способность к дальнейшему функционированию при наличии повреждений в структуре армирования и прост в производстве [1–3]. Для описания поведения рассматриваемых материалов в упругой области, без учета процесса накопления повреждений, предложено достаточно много моделей, базирующихся либо на использовании сведений о структуре материала [4], либо использующих представления континуальной механики [5, 6]. Все указанные выше модели описывают поведение гибких тканых композитов с учетом геометрической нелинейности, приводящей к конечным деформациям. При этом конечность деформаций обуславливается искажениями в топологии армирующей ткани (при малых деформациях материала волокон, образующих нити) в сочетании с законом деформирования материала матрицы [4–7].

В настоящее время в связи с интенсификацией процессов нагружения и все возрастающими требованиями к эксплуатационной безопасности конструкций и их элементов возникла необходимость учета влияния накопления повреждений на характеристики гибких тканых композитов. К подобным задачам относятся, например, задачи учета таких факторов, как усталость, коррозионная усталость, фотоусталость, износ и влияние ударного повреждения на пневматические оболочки быстровозводимых конструкций и судов на воздушной подушке.

Указанные выше модели ответить на поставленные вопросы не позволяют. При этом для жестких тканых композитов (тканых композитов) разработано достаточно большое число моделей, позволяющих учесть влияние процесса накопления повреждений на деформационные и прочностные характеристики материала. Все данные модели базируются на концепции элементарных повторяющихся ячеек (ЭПЯ), или ячеек периодичности [2, 8], вводимых по аналогии с элементарными ячейками в кристаллографии [9]. В зависимости от способа учета структуры материала в рамках ЭПЯ подходы разделяются на следующие группы: базирующиеся на классической ламинатной теории [1, 10]; модификация ламинатной теории с использованием криволинейных балок Тимошенко для описания упругих свойств одного из монослоев (без учета наличия повреждений и геометрической нелинейности) [11]; вводящие разбиение области ЭПЯ на подъячейки с линейными законами изменения структуры и с последующим осреднением по напряжениям в пределах подъячейки [8, 12]; базирующиеся на полном описании структуры в ЭПЯ с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [13, 14] (данный метод приводит к существенным вычислительным затратам даже при моделировании только упругого поведения [15]). Во всех перечисленных моделях вводится мера повреждений, но при этом практически во всех моделях, за исключением модели [12] (в которой для описания нелинейных деформаций одна из подъячеек моделируется балкой), не учитывается геометрическая нелинейность, возникающая в процессе деформирования. Последнее обусловлено тем, что материалы, для которых получены модели, не являются гибкими. Поэтому непосред-

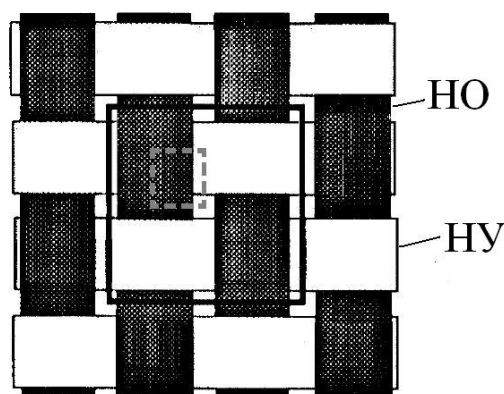


Рис. 1. Вид холщового плетения и элементарной повторяющейся ячейки

ственное применение указанных моделей при описании поведения гибких тканых композитов невозможно. Из всех приведенных выше методик для жестких композитов при описании гибких композитов в настоящее время применялись только методы, базирующиеся на полном описании структуры ЭПЯ с использованием МКЭ [16]. В данных моделях вводилось предположение о конечности деформаций как для материала матрицы, так и для материала армирующих волокон [16].

В данной работе предлагается структурная модель ЭПЯ, базирующаяся на балочной аналогии, позволяющая описывать процесс деформирования гибкого тканого композита как в упругой области, так и за ее пределами вплоть до окончательного разрушения материала.

Основные предположения модели

Будем описывать процесс статического деформирования в гибких тканых композитах. Рассмотрим материалы, у которых ткань имеет холщовое плетение, образуемое двумя нитями: основы и утка (НО и НУ на рис. 1). Как и любые другие ткани, указанные выше материалы имеют регулярную структуру, и для них можно выделить структурный элемент, который для данных материалов принято называть ЭПЯ. Традиционно для тканых композитов с холщовым плетением ЭПЯ имеет вид, обведенный на рис. 1 сплошной линией. Остановимся подробнее на выборе ЭПЯ. С учетом вида холщового плетения закон изменения формы нити одинаков как для нити основы, так и для нити утка. Рассмотрим без ограничения общности более детально вид нити основы, который показан на рис. 2. Базируясь на данном рисунке, можно сделать вывод, что нить основы имеет вид синусоиды. Применяя методику из работы [8], разобьем нить на участки с линейным законом

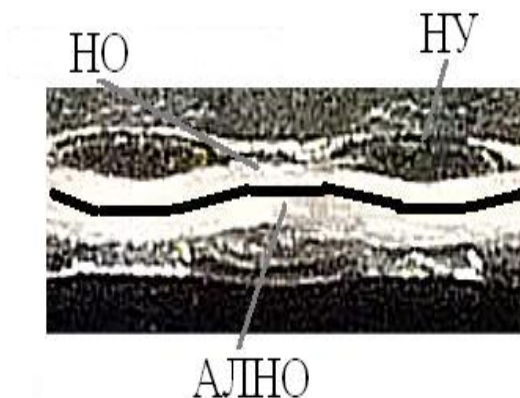


Рис. 2. Вид сечения материала вдоль нити основы

изменения структуры. Как видно из рис. 2, с достаточной степенью точности область соприкосновения нитей основы и утка может быть аппроксимирована горизонтальной прямой, а область вне нитей утка – наклонной прямой (линия АЛНО на рис. 2). Тогда вместо исходной ЭПЯ можно ввести структурный элемент более низкого уровня в виде крестообразного пересечения нитей основы и утка длиной в четверть периода структуры ткани, обведенный на рис. 1 штриховой линией.

Для рассматриваемого класса материалов модули упругости матрицы и армирующих элементов отличаются на несколько порядков [1, 2, 17], поэтому предположим, что наполнитель располагается только внутри нити тканой основы.

С учетом введенных выше положений модель структурного элемента тканого композита может быть рассмотрена как крестообразное пересечение двух кривых балок из однонаправленного композита. Одна из балок соответствует нити основы, а другая – нити утка. В общем случае нагрузка, приложенная к структурному элементу, может быть разложена на усилия, действующие в плоскости ткани вдоль каждой из нитей, и на усилие, приводящее к искажению структуры. В данной работе будет проведено моделирование поведения структурного элемента при условии, что вектор силы совпадает с направлением одной из нитей. Нить, вдоль которой действует сила, будет называться продольной, а перпендикулярная к ней – поперечной.

Рассмотрим поведение введенного структурного элемента. Предположим, что каждая из балок состоит из двух участков: горизонтального и наклонного. Нити взаимодействуют друг с другом на горизонтальных участках. Предположим также, что горизонтальные участки могут только растягиваться. Вид составных частей структурного элемента, способ их взаимодействия и геометрические параметры представлены

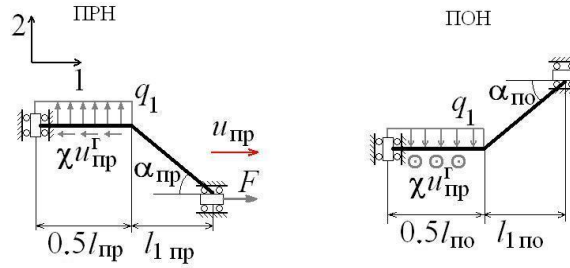


Рис. 3. Модель структурного элемента

на рис. 3, где ПРН – продольная нить, а ПОН – поперечная нить. Процесс деформирования структурного элемента композита будет описываться в приращениях, так как в ходе данного процесса предполагается изменение жесткостей материала и не малые изменения углов.

Моделирование деформирования материала до появления повреждений

Опишем процесс деформирования структурного элемента композита до появления первых повреждений. С учетом введенных выше предположений каждый из участков нити рассматривается как однонаправленный композит. Тогда с учетом расположения осей в нити, приведенного на рис. 3, упругие константы нитей примут вид [1]

$$E_1 = E_f m_f + E_m m_m, \quad E_2 = E_m / m_m (1 - \nu_m^2),$$

$$\nu_{21} = \nu_f m_f + \nu_m m_m, \quad G_{21} = \frac{G_f G_m}{G_f m_m + G_m m_f}, \quad (1)$$

где E_f, G_f, ν_f, m_f и E_m, G_m, ν_m, m_m – модуль Юнга, сдвиговой модуль упругости, коэффициент Пуассона и объемное содержание соответственно для волокна и связующего в нити.

Рассмотрим процесс деформирования структурного элемента в целом. Искомое удлинение структурного элемента равно удлинению продольной нити $u_{пр}$, которое равно сумме удлинений горизонтального $u_{пр}^r$ и наклонного $u_{пр}^h$ участков нити. Следовательно, в приращениях будем иметь

$$\Delta u_{пр} = \Delta u_{пр}^r + \Delta u_{пр}^h. \quad (2)$$

С учетом схемы нагружения горизонтально участка продольной нити, приведенной на рис. 3, краевая задача для нахождения удлинения рассматриваемого участка примет вид

$$\frac{d^2 u_{пр}^r}{dz^2} - \frac{\chi}{E_1 A_{пр}} u_{пр}^r = 0, \quad u_{пр}^r(0) = 0,$$

$$\frac{du_{пр}^r(0.5l_{пр})}{dz} = \frac{F}{E_1 A_{пр}}, \quad (3)$$

где $l_{пр}$ – длина прямолинейного участка ПРН, F – сила, приложенная к структурному элементу, z – координата вдоль прямолинейного

участка, $\chi = 4E_2 A_{но} / l_{пр}^2$ – коэффициент постели продольного волокна, $A_j, j = пр, по,$ – площадь поперечного сечения продольной и поперечной нити соответственно. Решение задачи (3) с учетом того, что процесс рассматривается в приращениях, имеет вид

$$\Delta u_{пр}^r = \Delta u_{пр}^r(0.5l_{пр}) = \frac{\Delta F}{\sqrt{\chi E_1 A_{пр}}} \frac{\exp(\sqrt{\chi/E_1 A_{пр}} l_{пр}) - 1}{\exp(\sqrt{\chi/E_1 A_{пр}} l_{пр}) + 1}. \quad (4)$$

Определим удлинение наклонного участка нити. Так как искомое удлинение представляет собой перемещение точки приложения силы F в направлении действия силы (см. рис. 3), то для его нахождения воспользуемся теоремой Кастельяно [18]. Будем иметь

$$\Delta u_{пр}^h = \Delta F \left(\frac{1.2}{G_{12} A_{пр}} + \frac{l_{1пр}^2}{24E_1 J_{пр} \cos^2 \alpha_{пр}} - \frac{1}{E_1 A_{пр}} \right) \times$$

$$\times l_{1пр} \sin \alpha_{пр} \left[1 + \frac{1}{2} \kappa l_{1пр} l_{1пр} \times \right. \quad (5)$$

$$\left. \times \left(\frac{1.2 \cos \alpha_{пр}}{G_{12} A_{пр}} + \frac{l_{1пр}^2}{24E_1 J_{пр} \cos \alpha_{пр}} + \frac{\sin^2 \alpha_{пр}}{E_1 A_{пр} \cos \alpha_{пр}} \right) \right]^{-1},$$

где $l_{1пр}$ – длина половины наклонного участка ПРН, $J_{пр}$ – осевой момент инерции поперечного сечения продольного волокна, κ – жесткость поперечного волокна при вертикальном смещении его горизонтального участка. Для нахождения к рассмотрим поперечное волокно и определим при заданной системе сил (см. рис. 3) вертикальное смещение его горизонтального участка с использованием интегралов Мора [18], а затем положим величину данного смещения равной единице. В итоге получим

$$\kappa = \frac{2}{l_{но} l_{1но}} \times$$

$$\times \left[\frac{1.2 \cos \alpha_{но}}{G_{12} A_{но}} + \frac{l_{1но}^2}{24E_1 J_{но} \cos \alpha_{но}} + \frac{\sin^2 \alpha_{но}}{E_1 A_{но} \cos \alpha_{но}} \right]^{-1}, \quad (6)$$

где $J_{но}$ – осевой момент инерции поперечного сечения поперечного волокна. Углы наклонных участков продольной и поперечной нити явля-

ются функцией удлинения наклонного участка соответствующей нити $\alpha_j = \alpha_j(u_j^H)$.

Моделирование процесса расслоения наклонных участков нитей

При дальнейшем нарастании уровня деформации касательные напряжения в матрице, вызванные изгибом, на наклонных участках достигнут предельного значения и произойдет продольное расслоение материала. Критерий расслоения имеет вид

$$\tau_{12 \max}^m = \tau_{\text{lim}}^m. \quad (7)$$

С учетом условия совместности деформаций связь между касательными напряжениями в композите τ_{12} и в матрице τ_{12}^m есть

$$\tau_{12}^m / G_m = \tau_{12} / G_{12}. \quad (8)$$

Касательное напряжение в композите на текущем шаге определяется по формуле $\tau_{12} = \sum \Delta \tau_{12}$. Так как наклонная нить находится в состоянии изгиба и имеет прямоугольное поперечное сечение, то максимум касательного напряжения достигается в середине нити. Тогда с использованием формулы Журавского [18] приращение максимального значения касательного напряжения для наклонного участка продольной и поперечной нитей определяется соответственно по формулам

$$\Delta \tau_{12 \text{ пр}} = \frac{3(\Delta F \sin \alpha_{\text{пр}} - 0.5 \kappa \Delta u_{\text{пр}}^H I_{\text{пр}} \cos \alpha_{\text{пр}})}{2 A_{\text{пр}}},$$

$$\Delta \tau_{12 \text{ по}} = \frac{3 \kappa \Delta u_{\text{по}}^H I_{\text{по}} \cos \alpha_{\text{по}}}{4 A_{\text{по}}}. \quad (9)$$

Принимая, что расслоившаяся нить представляет собой пакетную балку [18], в формулах (5) и (6) моменты инерции определим соотношениями

$$J_{\text{пр}}^{(i_{\text{пр}})} = J_{\text{пр}} / 2^{2i_{\text{пр}}}, \quad J_{\text{по}}^{(i_{\text{по}})} = J_{\text{по}} / 2^{2i_{\text{по}}}, \quad (10)$$

где $i_{\text{пр}}$ и $i_{\text{по}}$ – число расслоений продольной и поперечной нити соответственно. Выражения для приращения максимального значения нормального моментного напряжения на наклонных участках продольной и поперечной нитей принимают после расслоения вид

$$\Delta \sigma(M)_{\text{пр}} = \frac{2^{i_{\text{пр}}} (\Delta F l_{1\text{пр}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{пр}} - \kappa \Delta u_{\text{пр}}^H I_{1\text{пр}})}{2 W_{\text{пр}}},$$

$$\Delta \sigma(M)_{\text{по}} = \frac{\kappa \Delta u_{\text{по}}^H I_{1\text{по}} 2^{i_{\text{по}}}}{2 W_{\text{по}}}, \quad (11)$$

где $W_{\text{пр}}$, $W_{\text{по}}$ – момент сопротивления изгибу на наклонном участке продольной и попереч-

ной нити соответственно. С учетом принятого предположения о пакетном виде расслаиваемой балки, а также формул (7)–(9), в процессе расслоения нити величина максимального касательного напряжения в каждом из возникших слоев не изменяется по сравнению с исходной нитью, следовательно, можно принять, что процесс расслоения полностью проходит за один шаг по нагрузке. Данный процесс продолжается до тех пор, пока каждый слой не будет содержать ровно одно волокно, так как дальнейшее повреждение материала связано с нарушением адгезии между волокнами и связующим.

Деформирование материала на стадии вычленения волокон на наклонных участках нитей

После завершения процесса расслоения материала на наклонных участках нитей при дальнейшем деформировании в материале происходит вычленение волокон основы из связующего. Данный процесс обусловлен нормальными напряжениями σ_j^f , возникающими в волокнах композита. Критерий нарушения адгезии, получающийся из условия силового баланса на поверхности волокна, имеет вид

$$\sigma_j^f = 4 \tau_{\text{lim}}^m l_j^H / d, \quad (12)$$

где l_j^H – длина наклонного участка нити, d – диаметр волокна. С учетом условия совместности деформаций связь между нормальными напряжениями в композите σ_j и в волокне σ_j^f имеет вид

$$\sigma_j^f / E_f = \sigma_j / E_1. \quad (13)$$

Нормальное напряжение в композите определяется по формуле $\sigma_j = \sum \Delta \sigma(M)_j$. В данной зависимости $\Delta \sigma(M)_j$ есть приращения максимальных нормальных напряжений, возникающие в крайнем слое нити и определяемые по формуле (11).

В процессе развития нарушения адгезии происходит изменение жесткостных параметров в соотношениях (5), (6) и (11). Определим указанные изменения исходя из условия совместности деформаций пакетной балки. Предположим, что в $n_{\text{пр}}^f$ слоях продольной нити и в $n_{\text{по}}^f$ слоях поперечной нити произошло нарушение адгезии. Из условия совместности деформаций по кривизне имеем следующие соотношения:

$$M_j^f / E_f J_f = M_j^n / E_1 J_j^{(k_j)},$$

$$n_j^f M_j^f + n_j M_j^n = M, \quad (14)$$

где J_f – осевой момент инерции поперечного сечения волокна, M_j^f – момент, возникающий

в слое, потерявшем адгезию, $n_j = 2^{k_j}$ – число слоев в полностью расслоившейся нити, M_j^n – момент, возникающий в слое, не потерявшем адгезию, M_j – момент пакета. Из условия совместности деформаций по среднему углу сдвига имеем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} Q_j^f / G_f A_f &= Q_j^n / G_{12} A_j^{(k_j)}, \\ n_j^f Q_j^f + n_j Q_j^n &= Q_j, \end{aligned} \quad (15)$$

где A_f – площадь поперечного сечения волокна, $A_j^{(k_j)}$ – площадь поперечного сечения слоя, не потерявшего адгезию, Q_j^f – перерезывающая сила, возникающая в слое, потерявшем адгезию, Q_j^n – перерезывающая сила, возникающая в слое, не потерявшем адгезию, Q_j – перерезывающая сила в пакете.

С учетом соотношений (14) и (15) формулы (5), (6) и (12) примут соответственно вид

$$\begin{aligned} \Delta u_{np}^H &= \Delta F \left(\frac{1.2\mu_{np}^A}{G_{12} A_{np}} + \frac{l_{1np}^2 \mu_{np}^E}{24E_1 J_{np} \cos^2 \alpha_{np}} - \frac{1}{E_1 A_{np}} \right) \times \\ &\times l_{1np} \sin \alpha_{np} \left[1 + \frac{1}{2} \kappa l_{np} l_{1np} \left(\frac{1.2\mu_{np}^A \cos \alpha_{np}}{G_{12} A_{np}} + \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{l_{1np}^2 \mu_{np}^E}{24E_1 J_{np} \cos \alpha_{np}} + \frac{\sin^2 \alpha_{np}}{E_1 A_{np} \cos \alpha_{np}} \right) \right]^{-1}, \\ \kappa &= \frac{2}{l_{no} l_{1no}} \left[\frac{1.2\mu_{no}^A \cos \alpha_{no}}{G_{12} A_{no}} + \right. \\ &\left. + \frac{l_{1no}^2 \mu_{no}^E}{24E_1 J_{no} \cos \alpha_{no}} + \frac{\sin^2 \alpha_{no}}{E_1 A_{no} \cos \alpha_{no}} \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma(M)_{np} &= \frac{(\Delta F l_{1np} \operatorname{tg} \alpha_{np} - \kappa \Delta u_{np}^H l_{1np}) \mu_{np}^E}{2n_{np} W_{np}}, \\ \Delta \sigma(M)_{no} &= \frac{\kappa \Delta u_{no}^H l_{1no} \mu_{no}^E}{2n_{no} W_{no}}, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} \mu_j^E &= \frac{n_j^3 n_j^b}{n_j + (n_j E_f J_f / E_1 J_j - 1) n_j^f}, \\ \mu_j^A &= \frac{n_j n_j^b}{n_j + (n_j G_f A_f / G_{12} A_j - 1) n_j^f}, \end{aligned} \quad (19)$$

n_j^b – число волокон на ширине нити.

В случае, если волокна во всех слоях нити вычленились, то смещениями, вызываемыми изгибом, можно пренебречь. Пусть адгезию потеряет продольная нить, тогда $n_{np}^f = n_{np}$, и формула (16) примет вид

$$\begin{aligned} \Delta u_{np}^H &= \Delta F \left(\frac{1.2\mu_{np}^A}{G_{12} A_{np}} - \frac{1}{E_1 A_{np}} \right) l_{1np} \sin \alpha_{np} \times \\ &\times \left[1 + \frac{1}{2} \kappa l_{np} l_{1np} \left(\frac{1.2\mu_{np}^A \cos \alpha_{np}}{G_{12} A_{np}} + \frac{\sin^2 \alpha_{np}}{E_1 A_{np} \cos \alpha_{np}} \right) \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (20)$$

В случае, если адгезию потеряет поперечная нить, то есть $n_{no}^f = n_{no}$, формула (17) примет вид

$$\kappa = \frac{2}{l_{no} l_{1no}} \left[\frac{1.2\mu_{no}^A \cos \alpha_{no}}{G_{12} A_{no}} + \frac{\sin^2 \alpha_{no}}{E_1 A_{no} \cos \alpha_{no}} \right]^{-1}. \quad (21)$$

Сравнение с экспериментальными данными

Для проверки способности предложенной модели описывать процесс деформирования тканого композита было проведено сравнение с экспериментальными данными. Были испытаны прямоугольные образцы из тканого композита, представлявшего собой ткань холщового плетения из нейлонового волокна с полиуретановым наполнителем. Для испытания была использована универсальная машина LR5KPlus. Измерения удлинения образца проводились с помощью тензометра EPSILON STGA/50/50. Были испытаны две группы образцов: в первой растяжение проводилось вдоль нити основы, а во второй – вдоль нити утка. Результаты экспериментов приведены на рис. 4 и 5 соответственно (линии 2, 3, 4). Рассмотренный материал имел следующие геометрические параметры структуры: $d = 30$ мкм, $l_{np} = 1.1$ мм, $l_{1np} = 0.27$ мм, $l_{no} = 0.8$ мм, $l_{1no} = 0.2$ мм и толщину нити $h = 0.4$ мм. Линии 1 на рис. 4 и 5 – результаты моделирования на основе предложенной выше модели. При вычислениях использовались следующие механические характеристики материалов, составляющих композит: для нейлона [1] $E_f = 6$ ГПа, $\nu_f = 0.2$ и для полиуретана [1] $E_m = 60$ МПа, $\nu_m = 0.35$, $\tau_{lim}^m = 5$ МПа. Диаграммы на рис. 4 и 5 построены в координатах «натяжение ξ – деформация ϵ », где натяжение – сила, отнесенная к ширине образца, $\xi = F/b$.

Анализ результатов, приведенных на рис. 4, показывает, что наблюдается хорошее качественное совпадение теоретической и экспериментальных диаграмм деформирования: четко выделяются три участка на диаграмме, в отличие от модели А.М. Скудры [1] (линии 5 на рис. 4 и рис. 5) второй участок является наклонной линией, что соответствует экспериментальным данным, как полученным в данной работе, так и приведенным в литературе [4, 17]. Также наблю-

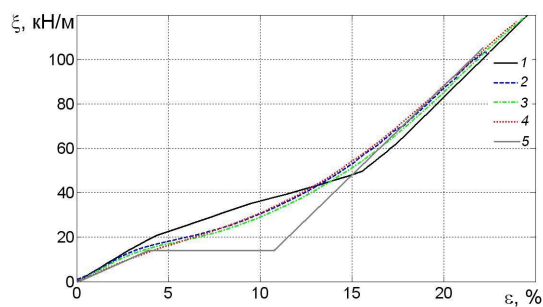


Рис. 4. Диаграмма деформирования при растяжении вдоль нити основы

дается хорошее количественное совпадение на первом и третьем участках, то есть на участках, на которых повреждения либо нет, либо процесс накопления повреждений закончился. Данные, приведенные на рис. 5, также показывают хорошее качественное совпадение теоретической и экспериментальных диаграмм деформирования.

Основное количественное расхождение теоретических и экспериментальных данных соответствует стадии накопления повреждений. В качестве одной из причин, объясняющих данное различие, может выступать то, что модель была построена для структурного элемента, а экспериментальные данные получены для материала, состоящего из множества структурных элементов, и при этом в ходе процесса накопления повреждений в материале существенную роль играет вероятностный разброс свойств структурных элементов.

Заключение

В работе предложена структурная модель, описывающая процесс деформирования гибкого тканого композита при статическом нагружении. Проведенное сравнение с экспериментальными данными показало, что модель позволяет достаточно хорошо качественно, а на ряде участков и количественно, описывать диаграмму деформирования рассматриваемого материала, причем как в случае растяжения вдоль нити основы, так и вдоль нити утка.

Список литературы

1. Композиционные материалы: Справочник / Под ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
2. Cox B., Flanagan G. Handbook of analytical methods for textile composites. NASA CR-4750, 1997. 176 p.
3. Dow N.F., Ramnath V., Rosen B.W. Analysis of

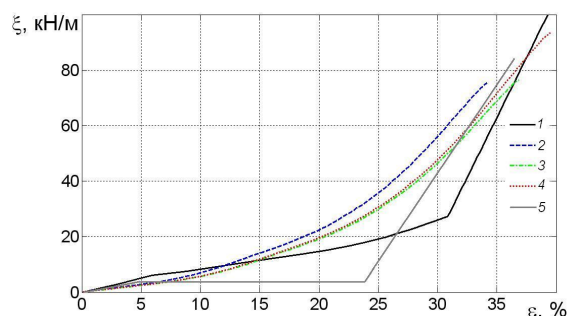


Рис. 5. Диаграмма деформирования при растяжении вдоль нити утка

woven fabrics for reinforced composite materials. NASA CR-178275, 1987. 243 p.

4. Haas R. The stretching of the fabric and the shape of the envelope. NACA TR-16, 1917. 154 p.

5. Man X., Swan C.C. A mathematical modeling framework for analysis of functional clothing // J. Eng. Fibers and Fabrics. 2007. V. 2. № 3. P. 10–27.

6. Wu Z., Au C.K., Yuen M. Mechanical properties of fabric materials for draping simulation // Int. J. Clothing Sc. Tech. 2003. V. 15. № 1. P. 56–68.

7. Handbook of Technical textiles /Eds. A.R. Horrocks, S.C. Anand. CRC Press. Cambridge, 2000. 677 p.

8. Naik R.A. Analysis of woven and braided fabric reinforced composites. NASA CR-194930, 1994. 46 p.

9. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Мир, 1978. 791 с.

10. Тканые конструкционные композиты / Под ред. Т.-В. Чу и Ф. Ко. М.: Мир, 1991. 432 с.

11. Edgren F., Asp L.E. Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites // Composites: Part A. 2005. V. 36. P. 173–181.

12. Naik R.A. Failure analysis of woven and braided fabric reinforced composites. NASA CR-194981, 1994. 47 p.

13. Whitcomb J.D. Three-dimensional stress analysis of plain weave composites. NASA TM-101672, 1989. 32 p.

14. Foye R.L. Finite element analysis of the stiffness of fabric reinforced composites. NASA CR-189597, 1992. 137 p.

15. Димитриенко Ю.И. и др. Моделирование поверхностей прочности композитов на основе микроструктурного конечно-элементного анализа // Наука и образование. 2012. № 11. С. 487–496.

16. Каюмов Р.А. Деформирование представительной ячейки пленочно-тканевого композита при конечных перемещениях // Механика композиционных материалов и конструкций. 2007. Т. 12. № 2. С. 165–173.

17. Берендеев Н.Н. и др. Экспериментальное исследование деформационных свойств тканых композитов // Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2006. Вып. 68. С. 213–220.

18. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1967. 552 с.

**THE DESCRIPTION OF THE FLEXIBLE WOVEN COMPOSITE BEHAVIOUR UNDER STATIC
LOADING WITH THE USE OF A STRUCTURAL MODEL**

N.N. Berendeev

A structural model to describe the behavior of a flexible woven composite is proposed. The deformation process of the woven composite is assumed to consist of three stages and its features are defined by damage accumulation. Warp and weft tension measurements shows a good agreement between theoretical and experimental data.

Keywords: flexible woven composite, damage, model, deformation curve.