

КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ И ПРОЧНОСТЬ ТЕРМОПЛАСТОВ, ХАОТИЧЕСКИ АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОВОЛОКНОМ

Ставров В. П., Наркевич А. Л.

*Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Республика Беларусь
vpstavrov@user.unibel.by*

Введение

Термопластичные полимеры, армированные стеклянными волокнами, находят все более широкое применение в нагруженных конструкциях, в частности, транспортных средств [1–3]. Для получения наибольшего армирующего эффекта стремятся получить материалы с длинными волокнами. Такие материалы получают, в частности, путем пропитки стеклоровинга расплавом матричного термопластичного полимера [3]. Однонаправленно армированный элемент является основным элементом структуры данного материала.

Жесткость и прочность материала в изделиях зависит от ориентации однонаправленно армированных элементов, которая, в свою очередь, существенно зависит от геометрии изделия и технологии его изготовления. Ввиду различной степени анизотропии структуры, получаемой при формообразовании изделий, показатели упругих свойств и прочности материалов, получаемые при испытаниях стандартных образцов и приводимые обычно без указания степени анизотропии материала, недостаточны для оценки жесткости и прочности изделий. В связи с этим, возникает необходимость прогнозирования жесткости и прочности термопластов, армированных стеклянными волокнами, с учетом структуры материала в изделиях.

Показатели прочности композиционных материалов, однонаправленно армированных волокнами, оценивают, используя методы микромеханики композитов [4]. При этом обычно не учитывают неоднородность элементов структуры и обусловленный этим процесс перераспределения нагрузки при нагружении. В то же время ввиду хаотической ориентации однонаправленных элементов структуры в изделиях из армированных термопластов повреждения наблюдаются уже на ранних стадиях нагружения. Полное разрушение происходит после достижения некоторого предельного уровня поврежденности элементов структуры. Для адекватной оценки прочности армированных термопластов необходимы модели, учитывающие кинетику разрушения [5].

Цель данной работы – оценить уровень предельной поврежденности и разрушающие напряжения при растяжении термопластичного полимера, хаотически армированного длинными стеклянными волокнами, в зависимости от степени анизотропии структуры по характеристикам упругости и прочности однонаправленных элементов и распределения углов, задающих ориентацию этих элементов, на основе модели, учитывающей накопление повреждений.

Модель структуры. Рассматривается материал, содержащий однонаправленно армированные (трансверсально изотропные) элементы, хаотически ориентированные в пространстве. В плоских изделиях, которые чаще всего изготавливают из термопластов, армированных длинными стеклянными волокнами, однонаправленные элементы имеют преимущественную ориентацию в плоскости (рис. 1).

Главные оси симметрии однонаправленных элементов структуры x'_1 (ось x'_3 направлена вдоль волокон, а оси x'_1 x'_2 лежат в трансверсальной плоскости) стохастиче-

ски ориентированы относительно осей координат x_i , связанных с изделием. Ориентация элемента задана углами сферической системы координат φ и θ (рис. 2). Предположим, что эти углы статистически независимы. Тогда при преимущественной ориентации элементов в направлении оси x_1 плотность совместного распределения углов φ и θ в материале плоского изделия может быть представлена в виде:

$$f_{\varphi, \theta}(x, z) = f_{\varphi}(x) f_{\theta}(z), \quad (1)$$

где

$$f_{\varphi}(x) = a_{\varphi} \cos^k k_{\varphi} x \text{ и } f_{\theta}(z) = a_{\theta} \sin^k k_{\theta} z \quad (2)$$

– плотности распределения углов φ и θ соответственно; a_{φ} и a_{θ} – параметры, определяемые из условий нормировки; k_{φ} и k_{θ} – параметры, характеризующие степень анизотропии структуры и разориентацию элементов относительно оси x_1 и плоскости $x_1 x_2$ соответственно, поскольку от их значений зависят средние квадратические отклонения углов s_{φ} и s_{θ} .

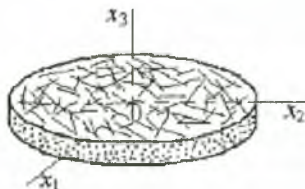


Рис. 1. Модель материала

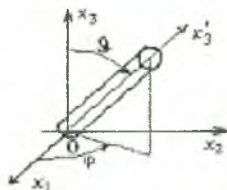


Рис. 2. Ориентация элемента структуры

Представление плотностей распределения углов в форме (2) дает широкие возможности аппроксимации экспериментальных данных и варьирования типа структуры при расчетах (табл. 1).

Таблица 1. Параметры структуры

Тип структуры	k_{φ}	k_{θ}	a	s_{φ}, s_{θ}
Однонаправленная (по оси x_3)	0	∞	$a_{11} = a_{22} = 0$ $a_{33} = 1$	$s_{\theta} = 0$
Хаотическая (равномерная) в пространстве	0	1	$a_{11} = a_{22} = a_{33} = 1/3$	$s_{\varphi} = 52^{\circ}$ $s_{\theta} = 39^{\circ}$
Хаотическая (равномерная) в плоскости ($x_1 x_2$)	0	0	$a_{11} = a_{22} = 1/2$ $a_{33} = 0$	$s_{\varphi} = 39^{\circ}$ $s_{\theta} = 0$
Преимущественная ориентация в плоскости ($x_1 x_2$)	> 1	> 50	$a_{11} = 0,5-0,9$ $a_{33} \ll 1$	$s_{\varphi} = 8-39^{\circ}$ $s_{\theta} < 10^{\circ}$

Ориентация элементов структуры относительно осей координат x_i задана также косинусами углов единичного вектора оси x_3' :

$$p_1 = \cos \varphi \sin \theta; \quad p_2 = \sin \varphi \sin \theta; \quad p_3 = \cos \theta. \quad (3)$$

Математические ожидания произведений косинусов называют тензорами ориентации. Компоненты тензора ориентации второго ранга равны

$$a_{ij} = \int_0^\pi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p_i p_j f_{\phi, \theta}(x, z) dx dz. \quad (4)$$

Значения диагональных компонент этого тензора наряду с параметрами плотности распределения и средними квадратическими отклонениями углов ϕ и θ можно рассматривать как степени армирования в соответствующих направлениях (см. табл. 1). Их свертка $a_{11} + a_{22} + a_{33} = 1$, а соотношения между компонентами характеризуют степень анизотропии структуры.

Свойства элементов структуры. Постоянные упругости трансверсально изотропного элемента заданы в системе координат x'_i модулями Юнга E'_1 и E'_3 , модулями сдвига G'_{12} и G'_{13} и коэффициентом Пуассона μ'_{13} . Прочность элемента в главных осях x'_i характеризуется семью величинами – разрушающими напряжениями при растяжении (индекс «+») σ^+_1 и σ^+_3 , при сжатии (индекс «-») σ^-_1 и σ^-_3 , а также разрушающими напряжениями при сдвиге в плоскости расположения волокон τ^+_{13} , τ^-_{13} и τ^-_{13} [6]. Предполагается, что длина элементов больше эффективной, определяемой из условий разрыва волокон, поэтому эффекты, обусловленные длиной волокон, в дальнейшем не учитываются.

Показатели упругих свойств и прочности однонаправленного элемента в главных осях x'_i могут быть найдены по экспериментальным данным или приближенно оценены по свойствам компонентов и объемной волокон P_s и связующего $P_c = 1 - P_s$ на основе методов микромеханики композитов [4].

В координатах x_i связанных с изделием и повернутых относительно координат x'_i , постоянные упругости (компоненты тензоров четвертого ранга модулей упругости и упругих податливостей) задаются формулами преобразования.

Разрушающее напряжение при растяжении под углом ϕ к направлению армирования рассчитываются с использованием предельной поверхности, представленной в виде полинома второй степени [6]

$$\sigma_\phi^+ = \{R_{33}\cos^2\phi + R_{11}\sin^2\phi + [(R_{3333}\cos^4\phi + 2(R_{1133} - 2R_{1313})\sin^2\phi \cos^2\phi + R_{1111}\sin^4\phi)]^{0.5}\}^{-1}, \quad (4)$$

где R_{11} , R_{33} , R_{1111} , R_{3333} , R_{1133} , R_{1313} – компоненты тензоров прочности, вычисляемые по значениям показателей прочности однонаправленно армированного элемента.

Модель разрушения. Рассмотрим растяжение вдоль главных осей симметрии структуры в плоскости $x_1 x_2$. Разрушающее напряжение каждого элемента зависит от угла ϕ и определяется по формуле (5). Предположим также, что деформации элементов одинаковы.

Доля разрушенных элементов Q равна вероятности того, что $\phi^* < \phi < \pi/2$, где ϕ^* – угол, задающий ориентацию элементов, прочность которых меньше действующих в них напряжений, т.е.

$$Q(\phi^*) = 2 \int_{\phi^*}^{\pi/2} f_\phi(x) dx. \quad (6)$$

Среднее напряжение в неразрушенных элементах после достижения поврежденности Q равно

$$\bar{\sigma} = \sigma_0(1 - Q). \quad (7)$$

В результате разрушения части элементов модуль Юнга материала уменьшается. Из условия равенства деформаций элементов следует:

$$\bar{E}_1(\varphi^*) = \int_0^{\varphi^*} E_1(x) f_{\varphi}(x) dx, \quad (8)$$

где $E_1(x)$ – модуль Юнга элемента в направлении оси x_1 как функция φ .

Пусть σ_{φ}^* – прочность элемента при растяжении под углом φ , тогда из условия равенства деформаций элементов имеем для напряжений

$$\sigma(\varphi) = \sigma_{\varphi}^* \bar{E}_1(\varphi) / E_1(\varphi). \quad (9)$$

Отношение $\sigma_{\varphi}^* / E_1(\varphi) = \varepsilon_{\varphi}^*$ представляет собой предельную деформацию однонаправленного элемента при растяжении под углом φ .

Зависимость между поврежденностью $Q(\varphi^*)$, приобретенной материалом после разрушения части элементов, и действующим при этом напряжением $\sigma(\varphi^*)$ дает диаграмму поврежденности материала. По ней находятся разрушающее напряжение как $\sigma^*_1 = \max \sigma(Q)$, и уровень поврежденности Q^* , накопление которой предшествует полному разрушению материала. По значениям $\sigma(\varphi^*)$ и $\varepsilon(\varphi^*) = \sigma(\varphi^*) / \bar{E}_1(\varphi^*)$ строится диаграмма деформирования материала вплоть до разрушения.

Результаты расчета и их обсуждение

Расчеты выполнены для стеклонеполненного полипропилена. Экспериментальные данные получены для полипропилена (каплен), армированного стеклоровингом ЕС13-2400. Однонаправленный материал с объемной степенью наполнения 0,16 изготавливали в виде лент толщиной до 1 мм путем пултрузионной пропитки стеклоровинга [3], а хаотически армированные материалы – путем сплавления под давлением отрезков однонаправленных лент длиной 20 мм. Параметры распределения угла φ , задающего ориентацию элементов, определяли после выжигания матричного полимера. Отклонение элементов от плоскости $x_1 x_2$ характеризует $\operatorname{tg} \theta \sim h/L$, где h – толщина, L – длина элемента. Ввиду малости этого отношения отклонением угла θ пренебрегали (принимали $s_{\theta} = 0$ и $a_{33} = 0$).

Расчетные зависимости модулей Юнга и разрушающих напряжений однонаправленного материала, растягиваемого под углом φ к направлению армирования, как функции угла между направлением волокон и направлением растяжения, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (рис. 3).

Диаграммы деформирования хаотически армированных материалов, рассчитанные с учетом накопления повреждений в процессе нагружения (рис. 4), зависят от структуры материала: с увеличением степени разориентации армирующих элементов, характеризующей средним квадратичным отклонением угла φ , они приобретают все большую нелинейность, свидетельствующую о возрастании доли поврежденных элементов. Правда, нелинейность экспериментально построенных диаграмм деформирования связана не только с накоплением повреждений элементов структуры, но и с нелинейной деформацией матричного полимера. Этим обусловлено некоторое различие диаграмм деформирования модельного и реального материалов.

Рис. 5 иллюстрирует зависимость поврежденности, накопленной до разрушения материала, от ориентации элементов. Доля поврежденных элементов, соответствующая полному разрушению материала, при равновероятной в плоскости ориентации ($s_{\varphi} = 52^\circ$) составляет около 0,5, с увеличением степени ориентации элементов в направлении растяжения она убывает (рис. 6) и уже при $s_{\varphi} = 20^\circ$ составляет всего лишь 0,01. Данный

вывод в равной мере относится как к направлению преимущественной ориентации элементов, так и перпендикулярному ему направлению.

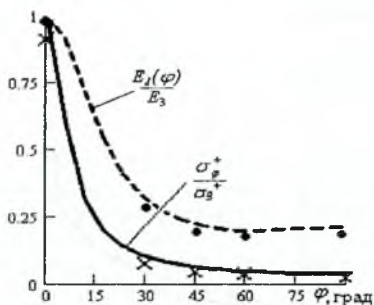


Рис. 3. Зависимость модуля Юнга и разрушающего напряжения от угла между направлениями армирования и растяжения

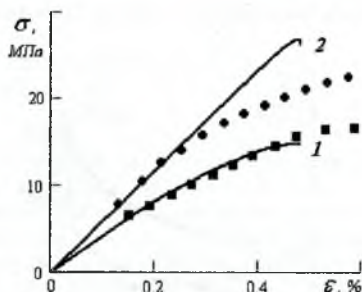


Рис. 4. Диаграммы деформирования при среднем квадратичном угле отклонения элементов: 1 — $s_\varphi = 52^\circ$; 2 — $s_\varphi = 32^\circ$

Расчетная зависимость разрушающего напряжения от степени разориентации армирующих элементов удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента. Снижение предельной поврежденности характерно как при растяжении в направлении преимущественного армирования, так и в перпендикулярном ему направлении.

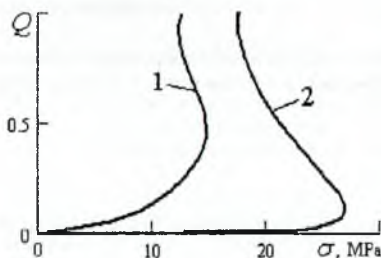


Рис. 5. Диаграммы поврежденности материала при среднем квадратичном угле отклонения элементов: 1 — $s_\varphi = 52^\circ$; 2 — $s_\varphi = 32^\circ$

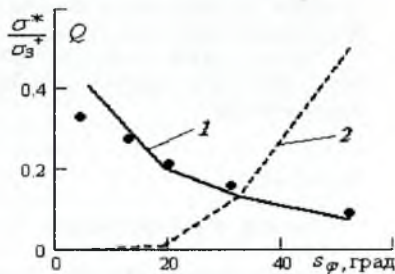


Рис. 6. Зависимость разрушающего напряжения (1) и накопленной поврежденности (2) материала от среднего квадратичного угла отклонения элементов

Изменение модулей упругости и разрушающих напряжений при растяжении в главных направлениях x_1 и x_2 с увеличением степени ориентации однонаправленных элементов структуры в направлении оси x_1 показано на рис. 7. Как и следовало ожидать, характер изменения показателей жесткости и прочности по мере возрастания степени анизотропии в плоскости армирования идентичен, однако степень анизотропии прочности заметно выше, чем степень анизотропии упругих свойств (рис. 8).

Изложенный метод оценки показателей прочности и поврежденности применим и в случае более сложной структуры композита. При этом для вычисления модулей упру-

гости, показателей прочности и поврежденности вместо функций угла φ в формулы (5)–(9) достаточно записать соответствующие функции углов ориентации элемента согласно формулам (3). Точность оценки зависит от качества исходных данных о свойствах компонентов и параметрах структуры материала.

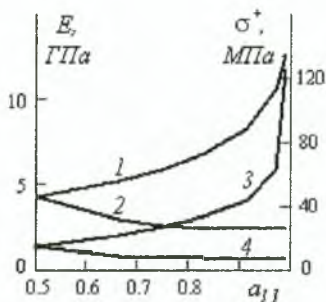


Рис. 7. Зависимость модулей Юнга по осям x_1 (1) и x_2 (2) и разрушающих напряжений (3) и (4) соответственно от степени армирования по оси x_1

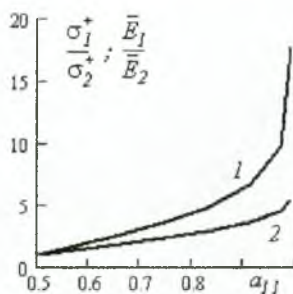


Рис. 8. Зависимость степени анизотропии прочности (1) и модуля Юнга (2) от степени анизотропии структуры

Выводы

Статистическая модель разрушения материалов, основанная на предположении о накоплении повреждений, предшествующих разрушению, дает количественные характеристики процесса деформирования и прочности термопластичных полимеров, хаотически армированных волокнами.

Предлагаемая методика может быть использована для прогнозирования прочности термопластов, армированных длинными волокнами, и оптимизации структуры материала в изделиях.

Список литературы

1. Comprehensive composite materials. Vol. 2. Polymer matrix composites. Oxford: Elsevier, 2000. - 759 p.
2. Henning F., Ernst H., Brüssel R. LFTs for automotive applications // Reinforced Plastics, 2005, Vol. 49, No 2, S. 24–33.
3. Ставров В.П. Формообразование изделий из композиционных материалов. Минск: БГТУ, 2006. – 482 с.
4. Gibson R.F. Micromechanics/Composite Engineering Handbook. New York: M. Dekker Inc., 1997, pp. 167–202.
5. Болотин В.В. Механика разрушения композитов / Композиционные материалы: Справочник. М.: Машиностроение, 1990. – С. 158–188.
6. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Прочность стеклопластиков при сложном напряженном состоянии // Механика полимеров, 1968, № 2, с. 70–78.