

КИНЕТИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МОНОСЛОЯ АРМИРОВАННОГО ПЛАСТИКА В ТРАНСВЕРСАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ С УЧЕТОМ ДИЛАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

С.Б. Сапожников, А.О. Щербакова

В работе приведены результаты исследования деформирования и разрушения монослоя стеклопластика с учетом влажностной дилатации матрицы. В расчетах учтены микронапряжения, возникающие на границе раздела фаз композита в результате набухания матрицы. Установлено, что влияние внезапного изменения влажности среды на трансверсальную прочность однонаправленного стеклопластика толщиной до 1 мм наиболее интенсивно проявляется в течение последующих двух–трех недель. Выработаны рекомендации по установлению минимального периода экспозиции во влажной среде для ответственных тонколистовых изделий из стеклопластика.

Введение

Воздействие на элементы конструкций факторов внешней среды (изменение температуры, влажности и др.) Можно обозначить одним термином – дилатационные воздействия, которые сопровождаются изменением объема материала и, как следствие, размеров деталей. Применительно к армированным волокнами пластикам, которые даже на микроуровне нельзя считать однородными, дилатационные воздействия приводят к возникновению системы самоуравновешенных микронапряжений на границах раздела волокон и матрицы. Эти напряжения оказывают существенное влияние на кинетику деформирования и механические характеристики материала в целом и должны учитываться. В литературе имеется значительное количество экспериментальных данных по снижению механических характеристик композитов в различных средах, при температурных воздействиях на большой временной базе и соответствующих эмпирических моделей [1–8]. Однако из спектра этих работ по существу выпал начальный период (до одного месяца), в течение которого отмечаются наиболее интенсивные изменения механических свойств композитов, связанные в основном с воздействием влаги (явления набухания – влажностной дилатации). Сложность и многообразие механизмов разрушения компонентов композитных материалов не позволяют построить простые аналитические подходы к прогнозированию изменения механических свойств этих материалов при дилатационных воздействиях. Поэтому предлагаемая статья посвящена разработке численного метода исследования кинетики деформирования и разрушения монослоя армированного пластика (на примере стеклопластика) с учетом влажностной дилатации матрицы. В расчетах учтены микронапряжения [10], возникающие на границе раздела волокно–матрица композита в результате влажностной дилатации.

Методика исследования

Для расчета трансверсального предела прочности однонаправленного монослоя армированного пластика использована модель пучка волокон (параллельно работающих ячеек) при малых деформациях [9]. Согласно этой модели реальная хаотичная укладка волокон заменена квазирегулярной (рис. 1), в которой каждая ячейка не связана с соседней, и все ячейки испытывают одинаковые перемещения U .

В расчет диаграммы деформирования монослоя поперек волокон заложена модель локального хрупкого разрушения ячеек. Согласно этой модели разрушение каждой ячейки происходит от действия микронапряжений на границе раздела волокно–матрица, причем, местные напряжения выше средних в α раз, где α – коэффициент концентрации трансверсальных напряжений [9]. Ячейка материала считается разрушившейся, если указанные местные напряжения в ней достигли предела прочности, при дальнейшем деформировании жесткость такой ячейки приравнивается к нулю.

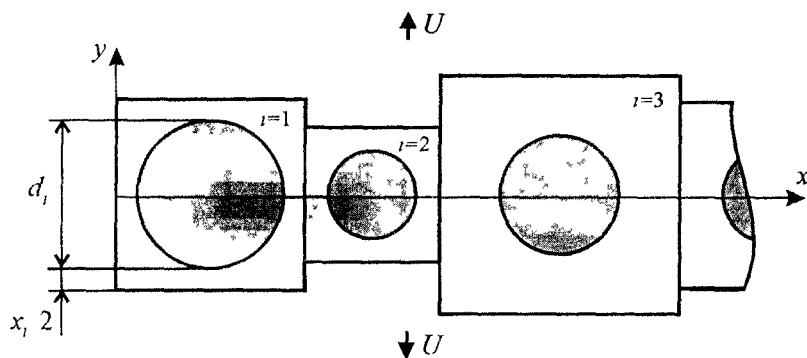


Рис. 1. Модель монослоя однонаправленного армированного пластика для расчета кривой деформирования при трансверсальном нагружении

Расчеты диаграмм деформирования проведены в двух случаях:

- а) расчет без учета средних радиальных напряжений, возникающих на границе волокно-матрица, что соответствует материалу, не насыщенному влагой;
- б) расчет с учетом радиальных микронапряжений (в качестве примера рассмотрен случай предельного насыщения влагой идеально упругого композита).

Моделирование деформирования разрушения армированных пластиков при нагружении поперек волокон осуществлено по следующему алгоритму:

- задание исходных данных для расчета;
- расчет напряжений и деформаций каждой ячейки монослоя в зависимости от перемещения U_j на j -м шаге нагружения;
- оценка состояния ячеек по критерию локальной прочности;
- расчет средних напряжений и деформаций монослоя для построения диаграммы деформирования.

Рассмотрим первый пункт алгоритма более подробно. Неизменные в расчете исходные данные приведены в табл. 1. В качестве примера использованы физико-механические характеристики, соответствующие типовому стеклопластику с эпоксидной (эпоксидно-фенольной) матрицей. Количество ячеек в расчете принято достаточно большим, чтобы обеспечить представительность выборки. Варьируемые в расчете параметры приведены в табл. 2.

Таблица 1

Таблица неизменных в расчете исходных данных

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Модуль упругости матрицы, МПа	E_m	$3 \cdot 10^3$
Модуль упругости волокон, МПа	E_f	$7 \cdot 10^4$
Количество ячеек	N	800
Коэффициент разбухания матрицы	β_m	0,5
Коэффициент разбухания волокон	β_f	0
Предельное влагосодержание матрицы, %	w_m^∞	5
Предельное влагосодержание волокон, %	w_f^∞	0
Среднее значение диаметра волокон, м	M_d	$1 \cdot 10^{-5}$
Среднее значение объемного коэффициента армирования	M_v	0,5
Среднее значение предела прочности границы раздела волокно-матрица, МПа	M_f	50

В табл. 2 k_d , k_v и k_f – коэффициенты вариации соответственно диаметра волокон, объемного коэффициента армирования и предела прочности границы раздела волокно-матрица.

Далее для выбранного варианта расчета (см. табл.2) в соответствии с усеченным нормальным законом распределения были заданы значения диаметров волокон d_i , (здесь и в дальнейшем i – номер ячейки), объемных коэффициентов армирования v_i и пределов прочности поверхности раздела σ_{e_i} в каждой ячейке.

Таблица варьируемых исходных данных

№ варианта	Расчеты с учетом дилатации					Расчеты без учета дилатации				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_d	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0
k_v	0,2	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,2	0,0
k_f	0,2	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,4

Рассмотрим второй пункт алгоритма. По заданному полю перемещений U_j (j – номер шага нагружения) было вычислено соответствующее поле средних деформаций ячейки в направлении нагружения:

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{U_j}{d_i + x_i}; \quad x_i = \left(\sqrt{\frac{\pi}{4v_i}} - 1 \right) \cdot d_i.$$

Здесь x_i – величина зазора (рис. 1), определяемая через диаметр волокна d_i и объемный коэффициент армирования v_i . Максимальные напряжения в ячейках, соответствующие найденному полю $\varepsilon_{i,j}$, были определены следующим образом:

$$\sigma_{i,j} = \varepsilon_{i,j} \cdot E_T(v_i) \cdot \alpha_i + \bar{\sigma}_{ri}, \quad \alpha_i = 1,5 - 0,5 \frac{E_m}{E_f} + 0,5 v_i \left(1 - \frac{E_m}{E_f} \right),$$

где $\bar{\sigma}_{ri}$ – величины радиальных микронапряжений с учетом локальной объемной доли волокна в ячейке; $E_T(v_i)$ – трансверсальный модуль упругости ячейки, вычисленный следующим образом:

$$E_T(v_i) = \left[2 \sqrt{\frac{v_i}{\pi}} \cdot I(v_i) + \left(1 - 2 \sqrt{\frac{v_i}{\pi}} \right) \cdot \frac{1}{1 - \mu_m^2} \right] \cdot E_m;$$

$$I(v_i) = \frac{1}{b_T(v_i) \cdot E_m} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{2a \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{a - b_T(v_i)}{a + b_T(v_i)}} \right)}{\sqrt{a^2 - (b_T(v_i))^2}} \right], \quad b_T(v_i) = 2 \sqrt{\frac{v_i}{\pi}} \left(\frac{1 - \mu_f^2}{E_f} - a \right); \quad a = \frac{1 - \mu_m^2}{E_m}.$$

Далее (третий пункт алгоритма) на основе полученных данных о величинах напряжений $\sigma_{i,j}$ производилась оценка прочности ячеек: если напряжения в ячейке превышали величину локального предела прочности F_i , то ячейка считалась разрушившейся и ее жесткость приравнялась нулю:

$$E_{i,j} = \begin{cases} E_T(v_i), & \sigma_{i,j} \leq F_i \\ 0, & \sigma_{i,j} > F_i \end{cases}.$$

Затем (четвертый пункт алгоритма) были вычислены средние напряжения и деформации в монослое для построения диаграммы деформирования:

$$H' = \sum_i (d_i + x_i), \quad E_j^c = \sum_i E_{i,j} \frac{d_i + x_i}{H'}, \quad \bar{\varepsilon}_j = \frac{U_j N}{H'}, \quad \bar{\sigma}_j = \bar{\varepsilon}_j E_j^c.$$

Результаты

Результаты расчетов показаны на рис. 2.

Анализ результатов показал, что в случае рассмотрения насыщенного влагой стеклопластика наибольшее влияние деформирование поперек волокон оказывает рассеяние локальной прочности матрицы, а в случае исследования сухого композита – рассеяние объемных долей ячеек. В плане упрощения модели вполне оправданной представляется рекомендация о пренебрежении рассеянием двух параметров модели (диаметра волокон и коэффициента армирования) и замена

коэффициента вариации третьего параметра (предела прочности границы раздела) эквивалентной величиной, что соответствует расчетам по вариантам 5 и 10. Таким образом, двухпараметрический закон распределения прочности границы раздела может вполне адекватно описывать деформирование модели, косвенно учитывая изменение других параметров.

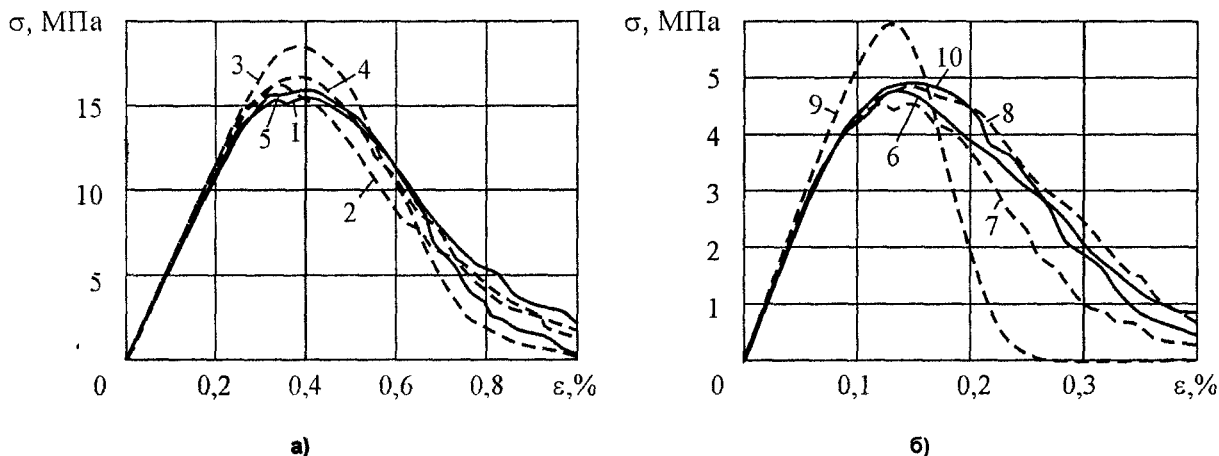


Рис. 2. Диаграммы деформирования материала поперек волокон в исходном и предельно насыщенном влагой состоянии (варианты расчета в табл. 2): а) сухой материал; б) увлажненный материал

Далее рассчитано изменение трансверсального предела прочности стеклопластика в процессе влагонасыщения. Величины средних радиальных напряжений на границе раздела волокно–матрица $\bar{\sigma}_r$ по толщине материала с учетом реологических свойств матрицы вычислены методом конечных элементов [10]. В расчете использован алгоритм Эйлера при условии малости деформаций ползучести по сравнению с полными деформациями. Считали, что скорость ползучести на каждом шаге интегрирования является линейной функцией величины эквивалентного напряжения. Реологические характеристики матрицы определены на основе известных экспериментальных данных А.Н. Анискевича [11]. В результате предельного влагонасыщения эпоксидная матрица набухает с изменением размеров до 1,6%, генерируя на поверхности раздела волокно–матрица средние растягивающие напряжения до 20 МПа. Это приводит к разрушению части наиболее слабых ячеек и общему снижению механических характеристик.

Листовые армированные пластики для средненагруженных конструкций авиационного назначения имеют типовые толщины в пределах от 0,5 до 1 мм. Поэтому расчеты были проведены для двух крайних вариантов толщин. В первом случае толщина материала была принята минимальной ($2h=0,5$ мм), во втором – максимальной ($2h=1$ мм).

На рис. 3а приведены графики, отражающие зависимость пределов прочности стеклопластикового монослоя при трансверсальном нагружении от времени влагонасыщения. Введены следующие обозначения: σ_{eT}^0 – трансверсальный предел прочности материала в начальном (ненасыщенном) состоянии (для рассматриваемого стеклопластика $\sigma_{eT}^0=30,1$ МПа); σ_{eT} – предел прочности, изменяющийся в зависимости от влагонасыщения материала. Кинетика влагопоглощения материалов показана на рис. 3б.

Расчеты показали, что поглощение влаги стеклопластиком приводит к снижению его прочностных свойств. Наиболее интенсивно прочность материала снижается на начальном этапе влагонасыщения, затем можно наблюдать некоторое восстановление прочности, что связано, по всей видимости, с перераспределением микронапряжений вследствие их релаксации.

Заключение

На основании разработанных моделей показано, что влияние внезапного изменения влажности среды на трансверсальные механические характеристики однонаправленного стеклопластика толщиной до 1 мм наиболее интенсивно проявляется в течение последующих двух–трех недель и может приводить к троекратному снижению предела прочности. В связи с этим рекомендуется

начинать эксплуатацию ответственных изделий не ранее прошествия указанного времени. В противном случае возможно нарушение герметичности конструкций или даже ее разрушение.

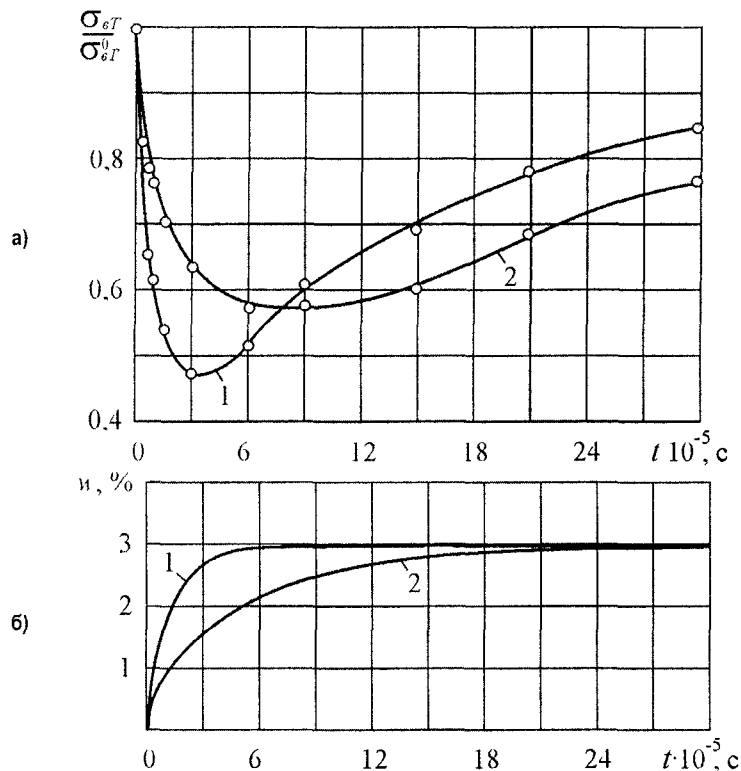


Рис. 3. Изменение прочностных и сорбционных характеристик стеклопластикового монослоя в зависимости от времени влагонасыщения (1 – монослой толщиной 0,5 мм; 2 – толщиной 1 мм): а) изменение трансверсального предела прочности; б) сорбционные кривые

Литература

1. Кружкова Е.Ю., Перов Ю.Ю., Локтин В.А., Мельников П.В. Исследование свойств эпоксидных органоуглепластиков в условиях термовлажностного старения // *Механика композитных материалов.* – 1990. – № 2. – С. 279–285.
2. Анискевич К.К., Курземниекс А.Х., Янсон Ю.О. Исследование влияния длительного воздействия температуры и влаги на упругие свойства и структуру органопластика // *Механика композитных материалов.* – 1985. – № 4. – С. 620–623.
3. Курземниекс А.Х. Влияние влаги на структуру и свойства органопластика // *Механика композитных материалов.* – 1980. – № 5. – с. 919–922.
4. Wright W.W. The effects of diffusion of water into epoxy resin their carbon-fibre reinforced composites // *Composites.* – 1981. – July. – P. 201–205.
5. Om K. Joshi. The effects of moisture on the shear properties on carbon-fibre composite s// *Composites.* – 1983. – № 3. – P. 196–200.
6. Скудра А.М., Бертулис Д.Р. Зависимость упругих характеристик армированных пластиков от температуры и влаги // *Механика композитных материалов.* – 1991. – № 1. – С. 105–109.
7. Delasi R., Whiteside J.B. Effect of moisture on epoxy resins and composites // *Advanced composite materials – environmental effects.* – Philadelphia: ASTM, 1977. – P. 2–20.
8. Chamis C.C. Simplified composite micromechanics equations for hydal, thermal and mechanical properties // *SAMPLE Quarterly.* – 1984. – № 3. – P. 14–23.
9. Сапожников С.Б. Дефекты и прочность армированных пластиков.– Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1994.– 161 с.
10. Щербакова А.О. Прогнозирование механических характеристик стеклопластиков с учетом дилатационных эффектов, обусловленных изменением влажности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2001.
11. Анискевич А.Н., Янсон Ю.О., Анискевич Н.И. Ползучесть эпоксидного связующего во влажной атмосфере // *Механика композитных материалов.* – 1992. – № 1. – С. 17–24.

Поступила в редакцию 16 апреля 2003 г.