

УДК 539.375

© 1993 г. Г. Г. БУЛЫЧЕВ, В. Н. КУКУДЖАНОВ

ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА, ВЫЗВАННОЕ ОБРЫВОМ ВОЛОКНА

В данной статье в двумерной постановке рассматривается процесс локального разрушения однонаправленного предварительно напряженного волокнистого композита при внезапном обрыве одного из волокон. Принимается трехслойная осесимметричная модель композита: упругое волокно — упруговязкопластическая матрица — эффективный слой. Эффективный слой моделирует ту часть композита, которая окружает оборванное волокно и цилиндрический слой матрицы вокруг него. Он считается однородным, трансверсально-изотропным. Ось изотропии материала эффективного слоя совпадает с осью волокна, а коэффициенты матрицы жесткостей определяются из механических и геометрических характеристик волокон и матрицы с помощью теории эффективных модулей [1]. Эта постановка задачи отличается от постановки, принятой в [2], где рассматривалась двухслойная модель волокно — матрица. В одномерной постановке задача была рассмотрена в [3].

На основе выбранной модели численно, методом пространственных характеристик [4, 5] исследуется вопрос о возможных механизмах локального разрушения в зависимости от соотношений между прочностью на отрыв волокна и прочностью соединения волокна с матрицей. Показано, что возможны три основных вида разрушения: дробление волокна, отслоение волокна от матрицы, разрыв матрицы и эффективного слоя в плоскости первоначального обрыва, а также их различные комбинации. Определены условия реализации этих видов разрушения. Рассмотрен случай, когда интерференция волн от двух одновременно распространяющихся трещин отрыва и отслоения приводит к их остановке.

1. Постановка задачи. Композит, состоящий из длинных волокон с параметрами $\rho_f, E_f, \nu_f, k_f, R_0$ и матрицы с параметрами $\rho_m, E_m, \nu_m, k_m, d$, растянут вдоль волокон (вдоль оси z) таким образом, что осевые напряжения в волокнах $\sigma_{zz}^f = P k_f$, а осевые деформации в волокнах и матрице равны между собой, т. е. $e_{zz}^f = e_{zz}^m$. Здесь ν — коэффициент Пуассона, ρ — плотность, E — модуль Юнга, k — предел текучести на сдвиг, R_0 — радиус волокна, d — толщина выделенного объема матрицы, окружающей волокно, индекс f относится к волокну, а индекс m к матрице, P — параметр нагружения.

Соотношения напряжения — деформация для эффективного трансверсально-изотропного слоя (индекс e) имеют вид [1]:

$$\sigma_{zz}^e = c_{11} e_{zz}^e + c_{12} e_{RR}^e + c_{12} e_{\theta\theta}^e \quad (1)$$

$$\sigma_{RR}^e = c_{12} e_{zz}^e + c_{22} e_{RR}^e + c_{23} e_{\theta\theta}^e$$

$$\sigma_{\theta\theta}^e = c_{12} e_{zz}^e + c_{23} e_{RR}^e + c_{22} e_{\theta\theta}^e, \quad \sigma_{Rz}^e = c_{33} e_{Rz}^e$$

$$c_{11} = E_{11} + 4\nu_{12}^2 K_{23}, \quad c_{12} = 2K_{23}\nu_{12}, \quad c_{22} = \mu_{23} + K_{23} \quad (2)$$

$$c_{23} = K_{23} - \mu_{23}, \quad c_{33} = 2\mu_{12}$$

где E_{11} — модуль упругости при одноосном нагружении, ν_{12} — коэффициент Пуассона при одноосном нагружении, K_{23} — объемный модуль упругости при плоском

деформированном состоянии, μ_{12} — модуль сдвига в плоскости zR , μ_{23} — модуль сдвига в плоскости $R\theta$.

Технические константы могут быть выражены через соответствующие параметры волокна и матрицы и удельный объем волокна $\omega_f = (1 + d/R_0)^{-2}$ по формулам

$$\begin{aligned}
 E_{12} &= \omega_f E_f + (1 - \omega_f) E_m + \frac{4\omega_f(1 - \omega_f)(v_f - v_m)^2}{(1 - \omega_f)(\mu_f + \lambda_f)^{-1} + \omega_f(\mu_m + \lambda_m)^{-1} + \mu_m^{-1}} \\
 \nu_{12} &= \omega_f \nu_f + (1 - \omega_f) \nu_m + \frac{\omega_f(1 - \omega_f)(v_f - v_m)[(\mu_m + \lambda_m)^{-1} - (\mu_f + \lambda_f)^{-1}]}{(1 - \omega_f)(\mu_f + \lambda_f)^{-1} + \omega_f(\mu_m + \lambda_m)^{-1} + \mu_m^{-1}} \\
 K_{23} &= \mu_m + \lambda_m + \omega_f \left[\frac{1}{\mu_f + \lambda_f - (\mu_m + \lambda_m)} + \frac{1 - \omega_f}{2\mu_m + \lambda_m} \right] \\
 \mu_{12} &= \mu_m \frac{\mu_f(1 + \omega_f) + \mu_m(1 - \omega_f)}{\mu_f(1 - \omega_f) + \mu_m(1 + \omega_f)} \\
 \mu_{23} &= \mu_m \left[1 + \omega_f \left(\frac{\mu_m}{\mu_f - \mu_m} + \frac{1}{2} \frac{3\mu_m + \lambda_m}{2\mu_m + \lambda_m} \right)^{-1} \right]
 \end{aligned} \tag{3}$$

параметры Ламе μ_f , λ_f , μ_m , λ_m волокна и матрицы, входящие в эти формулы, определяются с помощью опытов на одноосное растяжение и чистый сдвиг.

При выбранных параметрах волокна и матрицы и $P \leq \sqrt{3}$ волокно, матрица и окружающий их слой находятся в состоянии упругости, поэтому начальное статическое распределение напряжений во всех слоях может быть получено из решения соответствующей статической осесимметричной задачи.

На границах контакта волокна с матрицей и матрицы с трансверсально-изотропной средой задаются условия непрерывности для перемещений

$$u_R^f(R_0) = u_R^m(R_0), \quad u_R^m(R_0 + d) = u_R^e(R_0 + d) \quad (-\infty \leq z \leq \infty) \tag{4}$$

и радиальных напряжений

$$\sigma_{RR}^f(R_0) = \sigma_{RR}^m(R_0), \quad \sigma_{RR}^m(R_0 + d) = \sigma_{RR}^e(R_0 + d) \quad (-\infty \leq z \leq \infty) \tag{5}$$

а при $R \rightarrow \infty$ задано условие $\sigma_{Rz}^e = \sigma_{Rz}^e = 0$. Решение имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{zz}^f &= Pk_f, \quad \sigma_{RR}^f = -\sigma_{zz}^f(N_{23} - N_{31}\nu_f)M^{-1}, \quad \sigma_{Rz}^f = 0 \\
 \sigma_{zz}^m &= \sigma_{zz}^f(l_1M)^{-1}(N_{31} - 2M_0\nu_m), \quad \sigma_{\theta\theta}^f = \sigma_{RR}^f, \quad \sigma_{Rz}^m = 0 \\
 \sigma_{RR}^m &= -\sigma_{zz}^f(l_1M)^{-1}(\nu_m N_{31} - M_0 + 2(1 - 2\nu_m)R_0^2R^{-2}(N_{32} - M_0)) \\
 \sigma_{\theta\theta}^m &= \sigma_{RR}^m + 4(1 - \nu_m)\sigma_{zz}^fR_0^2R^{-2}(l_1M)^{-1}(N_{32} - M_0) \\
 \sigma_{RR}^e &= 2\sigma_{zz}^f\mu_{23}(R_0 + d)^2(2\mu_f + \lambda_f)^{-1}R^{-2}M^{-1}(\omega_f N_{32} - N_{31}\nu_{12} + (1 - \omega_f)(N_{21}l_2/2 + M_0)) \\
 \sigma_{zz}^e &= \sigma_{zz}^f E_{11}N_{31}(2\mu_f + \lambda_f)^{-1}M^{-1}, \quad \sigma_{\theta\theta}^e = -\sigma_{RR}^e, \quad \sigma_{Rz}^e = 0 \\
 l_1 &= (2\mu_f + \lambda_f)(2\mu_m + \lambda_m)^{-1}, \quad \beta_1 = (\mu_f - \mu_m)(2\mu_m + \lambda_m)^{-1} \\
 l_2 &= \mu_{23}^{-1}(2\mu_m + \lambda_m), \quad \beta_2 = 1 - \mu_{23}^{-1}\mu_m, \quad N_{21} = l_1 - \beta_1, \quad N_{22} = N_{21} - (l_1 + 1)/2 \\
 M_0 &= N_{21}(\nu_{12} + \mu_{23}^{-1}\mu_m) - N_{22}\beta_2\omega_f, \quad N_{31} = N_{21}[l_2 + \beta_2(1 - \omega_f)] + \beta_2\omega_f \\
 N_{32} &= N_{22}[l_2 + \beta_2(1 - \omega_f)] + \mu_{23}^{-1}\mu_m + \nu_{12}, \quad M = N_{31} - 2\nu_f N_{32}
 \end{aligned} \tag{6}$$

2. Основные уравнения. При $t = 0$ в плоскости $z = 0$ происходит мгновенный обрыв волокна. Перераспределение напряжений, вызванное обрывом волокна,

описывается уравнениями динамики упруговязкопластических сред. Для волокна и матрицы они имеют вид

$$\rho_i \partial_t V_\alpha = \partial_\xi \sigma_{\alpha\xi} + f'_\alpha \quad (i = f, m) \quad (7)$$

$$\partial_t \sigma_{\alpha\beta} = \lambda_i \delta_{\alpha\beta} \partial_\xi V_\xi + \mu_i (\partial_\alpha V_\beta + \partial_\beta V_\alpha) - F'_{\alpha\beta} - 2\mu_i \langle \Phi_i(S - k_i) \rangle s_{\alpha\beta} / (\tau_i S)$$

а для третьего (трансверсально-изотропного) слоя

$$\begin{aligned} \rho_e \partial_t V_\alpha &= \partial_\xi \sigma_{\alpha\xi} + f''_\alpha \quad (\alpha, \beta, \xi, \eta = R, z, \theta) \\ \partial_t \sigma_{\alpha\beta} &= c_{\alpha\beta\xi\eta} [0,5 (\partial_\xi V_\eta + \partial_\eta V_\xi) - F''_{\xi\eta} - \langle \Phi_e(S - k_e) \rangle s_{\xi\eta} / (\tau_e S)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\rho_e = \omega_f \rho_f + (1 - \omega_f) \rho_m, \quad s_{\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\beta} - \delta_{\alpha\beta} \sigma_{\xi\xi} / 3$$

где V_R и V_z компоненты скоростей частиц вдоль осей R и z , $\delta_{\alpha\beta}$ — единичный тензор; $c_{\alpha\beta\xi\eta}$ — компоненты симметричного тензора жесткостей трансверсально-изотропного тела, $\partial_t = \partial/\partial t$, $\partial_z = \partial/\partial z$, $\partial_R = \partial/\partial R$, $\partial_\theta = \partial/\partial \theta$; по повторяющимся индексам ξ и η проводится суммирование. Для описания упрочнения материала принимается следующая аппроксимация:

$$\begin{aligned} k_f &= k_f^0, \quad k_m = k_m^0 [A - (A - 1) (1 + W_m^p)^{-1}] \\ W_m^p &= \frac{1}{k_m^0} \int_0^t s_{\xi\eta} \dot{e}_{\xi\eta} dt \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь A — параметр упрочнения материала матрицы, W_m^p — работа пластических деформаций в матрице, k_i^0 — статический предел текучести материала слоя.

Правые части в уравнении для эффективного слоя, характеризующие вязкопластическую деформацию, рассчитываются по теории эффективных коэффициентов вязкости

$$\frac{\langle \Phi_e(S - k_e) \rangle}{\tau_e S} = \frac{\langle \Phi_f(S - k_f) \rangle}{\tau_f S} \omega_f + \frac{\langle \Phi_m(S - k_m) \rangle}{\tau_m S} (1 - \omega_f)$$

Эта формула соответствует последовательному соединению вязкопластических элементов волокна и матрицы при получении определяющего уравнения для эффективного слоя; $\langle \Phi(S - k) \rangle$ — операторная функция влияния скоростей пластических деформаций

$$\langle \Phi(S - k) \rangle = \begin{cases} 0 & \text{при } S \leq k \\ \Phi > 0 & \text{при } S > k \end{cases}$$

Φ — гладкая монотонно возрастающая функция аргумента $S - k$, τ — константа размерности [с], характеризующая вязкость за пределами упругости, $S = (0,5 s_{\xi\eta} s_{\xi\eta})^{1/2}$.

В силу симметрии задачи

$$V_\theta = \sigma_{R\theta} = \sigma_{z\theta} = f_\theta = 0, \quad \partial/\partial \theta \equiv 0, \quad f_R = (\sigma_{RR} - \sigma_{\theta\theta}) R^{-1}, \quad f_z = \sigma_{Rz} R^{-1}$$

$$F''_{zz} = F''_{RR} = \lambda V_R R^{-1}, \quad F''_{\theta\theta} = (2\mu + \lambda) V_R R^{-1}, \quad F''_{z\theta} = F''_{\theta z} = F''_{R\theta} = 0$$

$$F''_{\theta\theta} = V_R R^{-1}, \quad F''_{\theta R} = F''_{\theta z} = F''_{zz} = F''_{RR} = F''_{Rz} = 0$$

$$c_{zzzz} = c_{11}, \quad c_{zzRR} = c_{RRzz} = c_{12}, \quad c_{RRRR} = c_{\theta\theta\theta\theta} = c_{22}$$

$$c_{RzRz} = c_{33}, \quad c_{zz\theta\theta} = c_{\theta\theta zz} = c_{12}, \quad c_{RR\theta\theta} = c_{\theta\theta RR} = c_{23}$$

а все остальные компоненты тензора $c_{\alpha\beta\xi\eta} = 0$.

3. Граничные условия. В рассматриваемой задаче граничные условия имеют

сложный характер и изменяются в процессе решения, так как возможно образование свободных поверхностей и расслоение материала.

В плоскости обрыва волокна $z = 0$ при $0 \leq R \leq R_0$ и $t > 0$ выполняются условия

$$\sigma_{zz}^f = \sigma_{Rz}^f = 0 \quad (10)$$

При $R > R_0$ в матрице и трансверсально-изотропном слое в зависимости от соотношений между величинами σ_{zz}^m , σ_{zz}^e и соответствующими пределами прочности на отрыв σ_2 и σ_3 возможны два типа граничных условий:

$\sigma_{zz}^m < \sigma_2$ ($\sigma_{zz}^e < \sigma_3$) разрушения нет и выполняются условия симметрии относительно плоскости $z = 0$:

$$\sigma_{Rz}^m = V_z^m = 0 \quad (\sigma_{Rz}^e = V_z^e = 0) \quad (11)$$

$\sigma_{zz}^m > \sigma_2$ ($\sigma_{zz}^e > \sigma_3$) принимается, что произошло разрушение отрывом и в этих точках выполняются условия

$$\sigma_{zz}^m = \sigma_{Rz}^m = 0 \quad (\sigma_{zz}^e = \sigma_{Rz}^e = 0) \quad (12)$$

В зависимости от относительного положения берегов образовавшейся трещины

$$\Delta u_z = \int_{t_0}^t [V_z(+0, R, \tau) - V_z(-0, R, \tau)] d\tau$$

выполняются следующие условия:

при $\Delta u_z > 0$ трещина открыта и на ее берегах имеем

$$\sigma_{zz} (+0) = \sigma_{zz} (-0) = \sigma_{Rz} (+0) = \sigma_{Rz} (-0) = 0 \quad (13)$$

при $\Delta u_z \leq 0$ трещина закрывается и условия на ее берегах будут

$$V_z (+0) = V_z (-0), \quad \sigma_{zz} (+0) = \sigma_{zz} (-0) \quad (14)$$

Трещина может вновь открыться, если σ_{zz} на ее берегах станет растягивающим ($\sigma_{zz} > 0$), тогда вновь используются условия (12).

На поверхности контакта волокна с матрицей в зависимости от соотношений между σ_{RR} , σ_{Rz} и соответствующими пределами прочности склейки волокна с матрицей σ^* и τ^* — также могут реализовываться условия как равенства, так и любого типа неравенства: причем в начале моделирования задаются условия $\sigma_{RR} < \sigma^*$, $\sigma_{Rz} < \tau^*$ следующие из решений уравнений статики (6), при которых на границе раздела справедливы условия непрерывности (4) и (5). На границе раздела матрица — эффективный слой также заданы условия непрерывности.

Пусть в момент $t > 0$ в точке z на поверхности контакта волокна и матрицы происходит нарушение одного из условий $\sigma_{RR} < \sigma^*$ или $\sigma_{Rz} < \tau^*$, тогда считается, что в этой точке образуется трещина и на ее берегах принимаются условия свободной поверхности, если это трещина отрыва, или условия кулоновского трения, если это трещина сдвига. Для трещины отрыва граничные условия изменяются аналогично тому, как это было описано в плоскости $z = 0$, поэтому достаточно рассмотреть условия на берегах трещины сдвига

$$\text{при } |\sigma_{Rz}| \geq \tau^*: V_R^+ = V_R^-, \quad \sigma_{RR}^+ = \sigma_{RR}^- \quad (15)$$

$$\sigma_{Rz}^\pm = \mp \alpha |\sigma_{RR}| \operatorname{sgn}(V_z^+ - V_z^-), \quad \sigma_{RR} < 0$$

Если в точке контакта $\sigma_{RR} > 0$, то трещина сдвига раскрывается и на ее берегах выполняются условия свободной поверхности. После чего проверяются расхождения берегов, если $\Delta u_R < 0$, то вновь используются условия кулоновского

P	N	δ	$\xi^{(1)}$	$\xi^{(2)}$	$\xi^{(3)}$
1,2	4	1,0	1,276	3,020	1,386
		2,0	1,276	2,656	1,100
		3,0	1,276	2,545	1,043
	6	1,0	1,276	2,773	1,358
		2,0	1,276	2,585	1,107
		3,0	1,276	2,453	1,047
1,7	4	1,0	1,000	2,240	1,286
		2,0	1,000	2,084	1,054
		3,0	1,000	2,011	1,023
	6	1,0	1,000	2,084	1,062
		2,0	1,000	2,024	1,042
		3,0	1,000	1,977	1,032

трения (15). Аналогично ставятся условия и на контактной поверхности матрица — эффективный слой.

Граничные условия на внешней боковой поверхности трансверсально-изотропного слоя при $R = R_{\max} \gg R_0$ принимаем такими же, какие использовались в [2]. Это условия приближенно эквивалентны отсутствию отражения продольных и поперечных волн от поверхности $R = R_{\max}$:

$$\sigma_{RR}^e = \rho_e c_e^{(1)} V_R^e, \quad \sigma_{Rz}^e = \rho_e c_e^{(2)} V_z^e \quad (16)$$

$$c_e^{(1)} = (K_{23} + 4/3 \mu_{23})^{1/2} \rho^{-1/2}, \quad c_e^{(2)} = \mu^{1/2} \rho^{-1/2}$$

Величины пределов прочности трансверсально-изотропного слоя на отрыв и на сдвиг выбирались в соответствии с правилом смесей

$$\sigma_3 = \omega_f \sigma_1 + (1 - \omega_f) \sigma_2, \quad \tau_3 = \omega_f \tau_1 + (1 - \omega_f) \tau_2 \quad (17)$$

где σ_1 и τ_1 — пределы прочности на отрыв и на сдвиг окружающих волокон.

4. Параметры моделирования. Численное моделирование задачи проводилось методом пространственных характеристик [4, 6] при тетрагональной и гексагональной укладке волокон и следующих значениях параметров: $E_f = 2,27 \cdot 10^5$ Мпа, $\nu_f = 0,23$, $\rho_f = 7,7$ г/см³, $k_f = 9,6 \cdot 10^2$ Мпа, $E_m = 9,52 \cdot 10^3$ Мпа, $\nu_m = 0,33$, $\rho_m = 1,65$ г/см³, $k_f = 70$ Мпа, $\tau_f = 0,33$ с, $\tau_m = 0,1$ с, $\Phi_f = (S/k_f - 1)^{1/2}$, $\Phi_m = (S/k_m - 1)^{1/2}$, $\alpha = 0,3$, $R_0 = 0,12$ см, $R_{\max} = 3R_0 + d$.

Приведенные параметры соответствуют стальному волокну и полистироловой матрице, склеенным друг с другом. Расчет проводился для двух величин предварительных нагрузок $P = 1,2$ и $P = 1,7$, что соответствует упругому деформированию и при трех значениях толщины матрицы $d_1 = 0,12$ см, $d_2 = 0,24$ см, и $d_3 = 0,36$ см.

Время моделирования изменялось в пределах $0 \leq t \leq T$, $T = 2(d_3/c_m + 2R_0/c_e)$, где c_m и c_e — скорости продольных волн в направлении оси z в матрице и эффективном слое. Величины σ_1 , τ_1 , σ_2 , τ_2 , σ^* , τ^* , варьировались с целью исследования возможных механизмов разрушения композита.

5. Результаты моделирования. Результаты численного моделирования, обработанные с помощью программ машинной графики, представлены в таблице и на фиг. 1—8. Поскольку основной интерес представляет динамическое перераспределение осевых напряжений (σ_z) относительно их начальных статических

значений, все представленные в иллюстрациях осевые напряжения пронормированы на их статические значения (σ_s).

В таблице приведены максимальные относительные растягивающие динамические напряжения (динамические перегрузки) $\xi^{(i)} = \sigma_d / \sigma_s$, где $\sigma_d = \max_t \sigma_{zz}$ интервале времени $0 \leq t \leq 12 R_0 c_f^{-1}$ в i -м слое композита ($i = 1, 2, 3$), при двух предварительных нагрузках $P = 1,2$ и $P = 1,7$ для двух типов укладки волокон: тетрагональной ($N = 4$) и гексагональной ($N = 6$), и при трех характерных относительных толщинах матрицы $\delta_{(i)} = d_{(i)} / R_0$.

Данные таблицы показывают, что при упругом деформировании максимальные относительные перегрузочные напряжения во всех слоях композита больше, чем при упругопластическом. Так при $d = R_0$ в оборванном волокне $\xi^{(1)} \approx 1,3$, т. е. максимальные динамические растягивающие напряжения на 30% превышают статические, вследствие чего возможно дробление оборванного волокна. В матрице $\xi^{(2)} \approx 3,0$, что может привести к обрыву матрицы в плоскости $z = 0$, в эффективном слое $\xi^{(3)} \approx 1,4$, т. е. в волокнах первого пояса также возможен разрыв в плоскости $z = 0$ и дробление.

В зависимости от соотношений между максимальными динамическими напряжениями и пределами прочности на отрыв и на отслоение возможны четыре типа локального разрушения композита, если в качестве критериев разрушения на отрыв принять критерий максимального растягивающего напряжения, а для разрушения склейки между слоями — критерий максимального касательного напряжения

$$\begin{aligned} \sigma_d^{(1)} > \sigma_1, \quad \tau_d^{(2)} < \tau^*, \quad \sigma_d^{(2)} < \sigma_2, \quad \sigma_d^{(3)} < \sigma_3 \\ \sigma_d^{(1)} < \sigma_1, \quad \tau_d^{(2)} > \tau^*, \quad \sigma_d^{(2)} < \sigma_2, \quad \sigma_d^{(3)} < \sigma_3 \\ \sigma_d^{(1)} < \sigma_1, \quad \tau_d^{(2)} < \tau^*, \quad \sigma_d^{(2)} > \sigma_2, \quad \sigma_d^{(3)} < \sigma_3 \\ \sigma_d^{(1)} < \sigma_1, \quad \tau_d^{(2)} < \tau^*, \quad \sigma_d^{(2)} < \sigma_2, \quad \sigma_d^{(3)} > \sigma_3 \end{aligned} \quad (18)$$

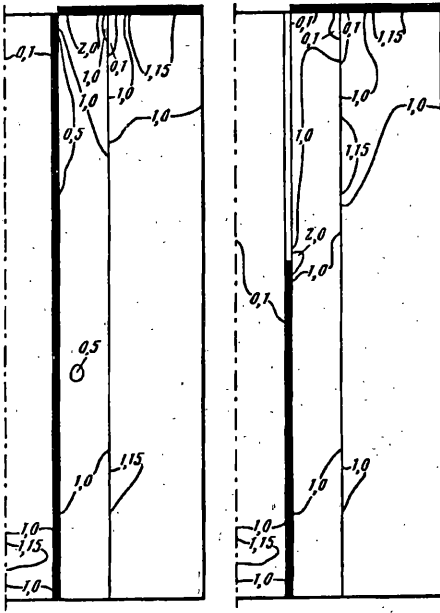
где $\tau_d^{(2)}$ — максимальное касательное напряжение на поверхности контакта волокна с матрицей.

Таким образом перераспределение напряжений при обрыве волокна приводит к какому-либо из четырех типов разрушений или к их комбинациям. Первый тип разрушений представляет собой дробление оборванного волокна, второй — отслоение волокна от матрицы, третий — обрыв матрицы и, наконец, четвертый — обрыв эффективного слоя.

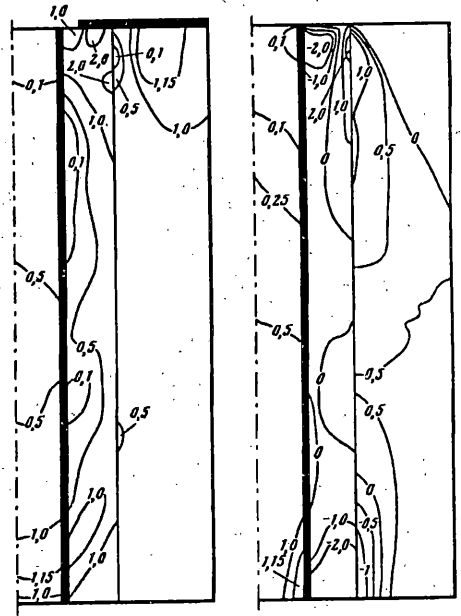
На фиг. 1—8 приведены изолинии осевых напряжений в композите. Темным цветом показаны участки на границе волокна и матрицы и в плоскости $z = 0$ на поверхности матрицы и эффективного слоя, которые в рассматриваемый момент не разрушились, а светлым — те, что разрушились. Цифрами показаны величины напряжений на изолиниях в каждом из трех слоев.

На фиг. 1 приведено распределение нормированных осевых напряжений $\sigma^{(i)} = \sigma_{zz}^{(i)} / \sigma_s^{(i)}$ ($i = 1, 2, 3$) в каждом из трех слоев композита в момент времени $T = 12 R_0 c_f^{-1}$, где c_f — продольная скорость звука в волокне. В этом примере прочность на отрыв и отслоение велики и соответствующего им разрушения не происходит. Из приведенных результатов расчетов видно, что наибольшие перегрузочные осевые напряжения во втором и третьем слоях сосредоточены в окрестности плоскости $z = 0$, а в первом слое — вблизи фронта упругой волны. Если прочность волокна на отрыв недостаточно велика, перегрузочные напряжения вблизи фронта волны могут вызвать в нем повторные отрывы, т. е. реализуется процесс дробления волокна.

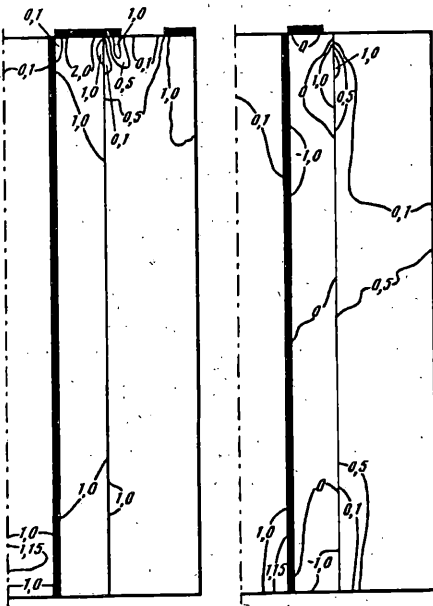
Если прочность τ мала (фиг. 2), то выполняется второе условие (18) и возникает трещина отслоения, показанная как незаштрихованная часть границы между волокном и матрицей. Образовавшаяся трещина разгружает окрестность



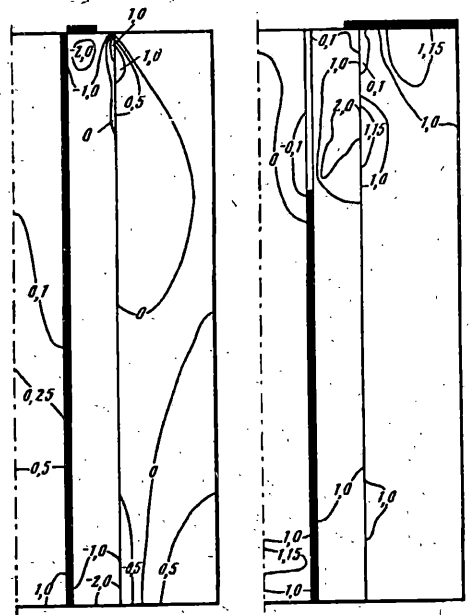
Фиг. 1, 2



Фиг. 3, 4



Фиг. 5, 6



Фиг. 7, 8

плоскости $z=0$ и, частично, границу между волокном и матрицей. При этом снижаются все растягивающие напряжения в волокне и в матрице, в том числе и в областях, образованных перегрузочными напряжениями (см. фиг. 2), и разрушения матрицы и эффективного слоя не происходит.

На фиг. 3 и фиг. 4 представлены изолинии для случая, когда выполняется третье условие (18), т. е. мала прочность матрицы на отрыв; фиг. 3 соответствует $T=12R_0c_f^{-1}$, а фиг. 4 — $T=24R_0c_f^{-1}$. Сравнительный анализ этих рисунков показывает, что трещина отрыва, возникшая первоначально в плоскости $z=0$ в

матрице, переходит в эффективный слой и приводит в конечном счете к глобальному разрушению композита.

Разгрузочные напряжения, возникающие вблизи границы $z=0$, приводят к уменьшению осевых и касательных напряжений на границе волокно — матрица, вследствие чего расслоения не происходит.

На фиг. 5 — фиг. 7 показана последовательность напряженных состояний композита при $T = 12R_0\sigma_f^{-1}$ для случая, когда трещина образуется при выполнении четвертого соотношения (18), т. е. когда прочность соединения волокно — матрица и прочность матрицы на отрыв достаточно велики, а прочность волокон, окружающих оборванное, лишь немного превышает его прочность. В этом случае трещина возникает в плоскости $z=0$ в эффективном слое (фиг. 5) и с течением времени распространяется в обе стороны вдоль указанной плоскости (фиг. 5, 7).

Приведенный анализ показывает, что при малых прочностях склейки волокно — матрица происходит отслоение волокна, не приводящее к потере несущей способности композита: область разрушения ограничивается оборванным волокном и не распространяется на матрицу. При малых прочностях волокон возможно как локальное (дробление оборванного волокна), так и глобальное разрушение (обрыв соседних волокон), при малой прочности матрицы и эффективного слоя и большой прочности склейки волокно — матрица обрыв матрицы всегда приводит к глобальному разрушению.

Кроме указанных четырех основных типов разрушения возможны их комбинации, некоторые из которых могут привести к локализации разрушений композита. Для одной из таких комбинированных схем разрушения (отслоение плюс частичный обрыв матрицы) картина перераспределения осевых напряжений показана на фиг. 8. Здесь реализуются случаи $\tau_d^{(2)} > \tau$, $\sigma_d^{(2)} > \sigma_2$ и выбрано $\sigma_2/\tau = 1,16$; $T = 12R_0\sigma_f^{-1}$. В этом случае взаимодействие волн разгрузки, возникающих при одновременном отслоении волокна и движении трещины отрыва в матрице приводит к взаимному ослаблению напряжений на трещинах и к их остановке, при этом процесс локального разрушения прекращается и глобального разрушения не происходит. Однако диапазон отношений величин τ и σ_2 , при котором происходит такое взаимодействие, достаточно узок ($\sigma_2 = 1,1 - 1,4\tau$ при $d = 3R_0$ и $\sigma_2 = 1,15 - 1,20\tau$ при $d = R_0$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. С. 76—90.
2. Кукуджанов В. Н., Бульчев Г. Г. Численное исследование динамической прочности однонаправленного композита, ослабленного обрывом волокна // В сб.: Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Наука, 1988. С. 117—124.
3. Овчинский А. С. Разрушение композиционных материалов. М.: Наука, 1989, 286 с.
4. Кукуджанов В. Н. Численное решение неоднородных задач распространения волн напряжений в твердых телах. М.: ВЦ АН СССР, 1976. Вып. 6. 67 с.
5. Бульчев Г. Г. Характеристическая форма уравнений динамики анизотропных упруговязкопластических сред // Докл. АН СССР. 1990. Т. 314: № 2. С. 312—315.

Москва

Поступила в редакцию
10.II.1993