ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ

Մեխանիկա 44, № 2, 1991 Механика

УДК 539.4

МОДЕЛЬ ДЕФОРМАТИВНОСТИ И ПРОЧНОСТИ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА С УЧЕТОМ НЕПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ ВОЛОКОН

СИМОНЯН А. М.

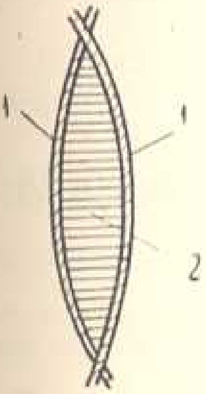
Строится модель деформирования и разрушения волокнистого композита. Принимается, что наполнитель представляет собой систему первоначально искривленных волокон, воспринимающих всю внешнюю нагрузку, при этом связующее препятствует выпрямлению волокон, содействуя вовлечению их в работу. Принимая, что количество волокон неограниченно велико, строятся детерминированные соотношения для описания деформативных и прочностных свойств композита на основе упругих и прочностных свойств волокон с учетом их разброса по стохастически заданной криволинейности, а также на основе упругих свойств связующего и его прочности на сдвиг.

Как известно, прочность однонаправленно-армированного композита вдоль волокон, зачастую, существенно ниже прочности наполнителя, и, следовательно, вопрос о повышении реализации прочности наполнителя в композите актуален. Согласно простейшему расчету, основанному на «законе смесей» у композита лишь 1—2,5% [1] от внешней растягивающей нагрузки воспринимается связующим, то есть вид связующего и технология отверждения или термообработки композита практически не влияют на долю нагрузки, воспринимаемой волокнами. Однако, как показывают эксперименты, технология изготовления композита существенно влияет на его упругие и прочностные свойства, причем влияние это имеет место не только за счет изменения пористости связующего и, следовательно, изменения фактического коэффициента армирования по объему.

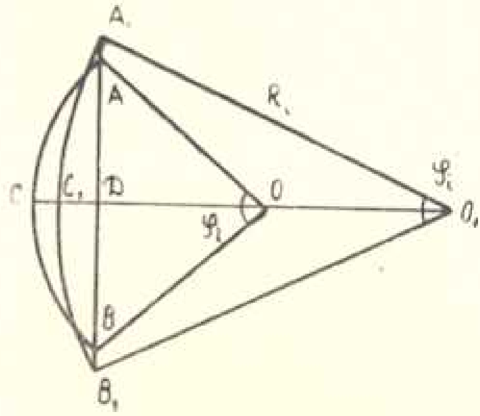
В настоящей работе природа сопротивления композита растяжению вдоль волокон представляется следующим обарзом. Принимается, что наполнитель представляет собой систему первоначально искривленных волокон [2], воспринимающих всю внешнюю нагрузку, при этом связующее препятствует выпрямлению волокон, содействуя вовлечению их в работу. После разрушения какого-либо волокна оно выключается из работы по некоторой длине, определяемой свойствами компонентов композита и их сцеплением. Принимая, что количество волокон в композите неограниченно велико, строятся детерминированные соотношения для описания деформативных и прочностных свойств композита на основе упругих и прочностных свойств волокон с учетом их разброса и стохастически заданной криволинейности, а также на основе упругих свойств связующего и его прочности на сдвиг.

1. Рассмотрим растягиваемый элемент (фиг. 1), состоящий из симметрично искривленных по дуге волокон наполнителя (1.1) с заполнением (2) из связующего. На фиг. 2 половина этого элемента показана до (АСВД) и после ($A_1\ C_1\ B_1Д_1$) деформации.

Для продольной деформации элемента ε имеет место следующее выражение:



Фиг. 1.



Фиг. 2.

$$\varepsilon=\frac{AA_1+BB_1}{AB}=\frac{R'_i\sin\frac{\varphi'_i}{2}}{R_i\sin\frac{\varphi_i}{2}}-1 \qquad (1.1)$$

Для деформации волокна ε_i и деформации связующего ε_c очевидны следующие выражения:

$$\varepsilon_i=\frac{\breve{A_1B_1}-\breve{AB}}{\breve{AB}}=\frac{R'_i\varphi'_i}{R_i\varphi_i}-1$$

$$\varepsilon_c=-\frac{\breve{CD}-\breve{C_1D}}{\breve{CD}}=\frac{R'_i\sin^2\frac{\varphi'_i}{4}}{R_i\sin^2\frac{\varphi_i}{4}}-1 \qquad (1.2)$$

Используя приближения для малых углов

$$\sin x\simeq x-\frac{x^3}{6};\quad \sin^2 x\simeq x^2-\frac{x^4}{3}$$

в применении к $\frac{\varphi_i}{2}$ и $\frac{\varphi_i}{4}$, получим следующее соотношение:

$$\varepsilon_c=-\frac{12}{\varphi_i^2}(\varepsilon-\varepsilon_i) \qquad (1.3)$$

Используя условие равновесия для волокна с диаметром

$$P_i = -\delta_i R_i \sigma_c \tag{1.4}$$

и принимая, что волокна и связующее деформируются упруго, получим

$$\varepsilon_i = \frac{4P_i}{\pi E_i \delta_i^2}; \quad \varepsilon_c = \frac{\sigma_c(1-\mu_c^2)}{E_c} \tag{1.5}$$

где E_i, E_c и μ_c — модули упругости i-го волокна и связующего и коэффициент Пуассона связующего, соответственно.
Уравнение (3) перепишется так:

$$P_i\left(\frac{1-\mu_c^2}{\delta_i R_i E_c} + \frac{48}{\varphi_i^2 \pi E_i \delta_i^2}\right) = \frac{12}{\varphi_i^2}\varepsilon, \tag{1.6}$$

Отметим, что φ_i однозначно определяется отношением разницы длин волокна l_i и элемента l к длине элемента, независимо от R_i

$$\frac{h_i}{l} = \frac{l_i - l}{l} = \frac{R_i\varphi_i - 2R_i \sin\frac{\varphi_i}{2}}{2R_i \sin\frac{\varphi_i}{2}} \simeq \frac{\varphi_i^2}{24}$$

что позволяет формулу (6) переписать так

$$P_i = \varepsilon\left(\frac{4}{\pi E_i \delta_i^2} + \frac{2h_i(1-\mu_c^2)}{\delta_i R_i l E_c}\right)^{-1} \tag{1.7}$$

Ясно, что формула (1.7) сохраняется и для случая элементов с несколькими волокнами.

2. Рассмотрим систему из параллельно соединенных элементов с некоторой длиной l при условии, что все эти элементы имеют одну и ту же кривизну ($R_i = R$), при этом, как показано выше, могут быть моделированы элементы с произвольным $\frac{h_i}{l}$ с помощью подбора φ_i и длины полуволны l_i. Естественно принять, что для деформационного поведения такой системы не важно, в каком соседстве друг с другом находятся волокна с тем или иным искривлением и они могут рассматриваться расположенными хаотически (фиг. 3).
Из условия равновесия такой системы имеем

$$\sum_N P_i = \sigma F_0 \tag{2.1}$$

где F_0 и σ — площадь поперечного сечения и среднее напряжение системы элементов, N — количество элементов. Положим, что можем пренебречь разбросом упругих свойств и сечений волокон ($E_i = E_0$, $\delta_i = \delta$). При подстановке в уравнение (2.1) соотношения (1.7) и при использовании очевидного $NF_* = \psi F_0$, где ψ — коэффициент армирования по объему, получим

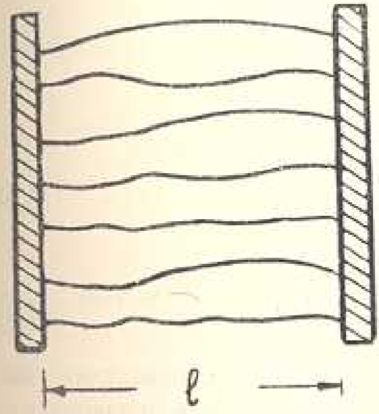
$$\sigma = \varepsilon\frac{\psi E_0}{N}\sum_N\left(1 + \frac{\pi\delta h_i(1-\mu_c^2)}{2Rl}\frac{E_0}{E_c}\right)^{-1} \tag{2.2}$$

В предположении, что число элементов N неограниченно велико, из соотношения (2.2) получим

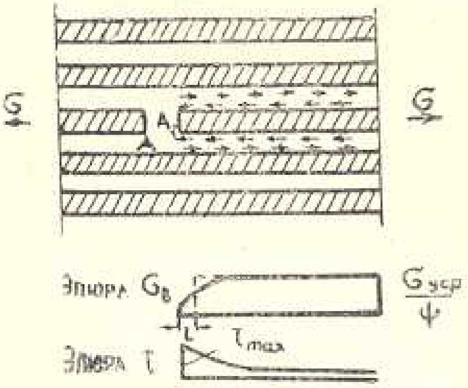
$$\frac{\sigma}{\varepsilon}=\frac{2\psi RE_c}{\pi\delta}\int\limits_0^{\infty}\rho\left(\frac{2RE_c x}{\pi\delta E_в(1-\mu_c^2)}\right)\frac{dx}{1+x} \tag{2.3}$$

где ρ — плотность распределения $\frac{h_i}{l}$, Очевидно $\rho(y)=0$ при $y<0$.

Соотношение (2.3) сохраняется для любой системы элементов по длине образца и, следовательно, описывает деформационные свойства однонаправленно-армированного композита вдоль волокна до начала разрушения волокон. Правая часть соотношения (2.3) представляет собой эффективное значение модуля упругости композита, зависящее от распределения $\frac{h_i}{l}$, определяющего криволинейность волокон, а также и от модуля упругости связующего, сопротивляющегося выпрямлению волокон.



Фиг. 3.



Фиг. 4.

3. Как известно, после разрыва волокна в композите при удалении от точки разрыва волокно это оказывается нагруженным благодаря сопротивлению сдвигу связующего. Ниже, аналогично [3], приведем простейший расчет напряжений в волокне и в связующем в области разрыва. На фиг. 4 схематически показано волокно, разорванное в точке A_1, причем до разрыва точки A и A_1 находились на одной вертикали. Перемещение точки A_1 вправо тормозится касательными напряжениями, передающимися через связующее. Принимая, что неразорванные волокна деформируются одинаково независимо от расстояния их от разорванного волокна, получим соотношение

$$u_в-u_{уср}=\Delta\gamma \tag{3.1}$$

где Δ — толщина прослойки связующего, $u_в$ и $u_{уср}$ — перемещения точек разорванного волокна и неразорванных волокон, соответственно.

Дифференцируя уравнение (3.1) по z и используя очевидные соотношения

$$\frac{du_{\text{уср}}}{dz}=\frac{\sigma_{\text{уср}}}{E_k},\quad \frac{du_{\text{в}}}{dz}=\frac{\sigma_{\text{в}}}{E_{\text{в}}},\quad \gamma=\frac{\tau}{G_c}$$

получим

$$\frac{\sigma_{\text{в}}}{E_{\text{в}}}-\frac{\sigma_{\text{уср}}}{E_k}=\frac{\Delta}{G_c}\frac{d\tau}{dz} \tag{3.2}$$

Используя условие равновесия элемента волокна

$$\tau=\delta\frac{d\sigma_{\text{в}}}{dz} \tag{3.3}$$

а также очевидное условие $\frac{d\sigma_{\text{уср}}}{dz}=0$, получим следующее уравнение:

$$\frac{d^2\tau}{dz^2}-\gamma_1^2\tau=0,\qquad \gamma_1=\sqrt{\frac{G_c}{\Delta E_{\text{в}}\delta}} \tag{3.4}$$

Решая уравнения (3.4) и (3.3) при краевых условиях $\tau|_{z\to\infty}=0$, $\sigma_{\text{в}}|_{z=0}=0$, $\sigma_{\text{в}}|_{z\to\infty}=\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}$, получим

$$\sigma_{\text{в}}=\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}\left(1-\exp\left(-\sqrt{\frac{G_c}{\Delta E_{\text{в}}\delta}}\,z\right)\right)$$

$$\tau=\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}\sqrt{\frac{G_c\delta}{\Delta E_{\text{в}}}}\exp\left(-\sqrt{\frac{G_c}{\Delta\delta E_{\text{в}}}}\,z\right) \tag{3.5}$$

при этом

$$\tau_{\max}=\tau\Big|_{z=0}=\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}\sqrt{\frac{G_c\delta}{\Delta E_{\text{в}}}}\simeq\sigma_{\text{уср}}\sqrt{\frac{G_c}{E_{\text{в}}}}\sqrt{\frac{1}{\psi(1-\psi)}} \tag{3.6}$$

формулы (3.5) и (3.6) имеют место в случае упругого поведения связующего. В случае же проявления пластических свойств значения напряжений τ будут меньшими, то есть если адгезионная прочность и прочность связующего на сдвиг превышает значение (3.6), то опасность распространения продольной трещины и постепенного выключения всего волокна из работы не имеет места. Заменим напряженное состояние волокна ступенчато-изменяющимся (на фиг. 4 показано штриховыми линиями) путем смещения напряжений вдоль волокна так, чтобы площадь эпюры напряжений была бы той же, что обеспечило бы адекватность вклада волокна в восприятии композитом внешней нагрузки. При этом длина условно ненагруженной части волокна L, которую будем считать длиной неэффективной части волокна, определится по формуле

$$L=\frac{\int\limits_0^\infty\left(\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}-\sigma_{\text{в}}(z)\right)dz}{\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}}=\sqrt{\frac{\delta\Delta E_{\text{в}}}{G_c}} \tag{3.7}$$

Дифференцируя уравнение (3.1) по z и используя очевидные соотношения

$$\frac{du_{\text{уср}}}{dz}=\frac{\sigma_{\text{уср}}}{E_k},\quad \frac{du_{\text{в}}}{dz}=\frac{\sigma_{\text{в}}}{E_{\text{в}}},\quad \gamma=\frac{\tau}{G_c}$$

получим

$$\frac{\sigma_{\text{в}}}{E_{\text{в}}}-\frac{\sigma_{\text{уср}}}{E_k}=\frac{\Delta}{G_c}\frac{d\tau}{dz} \tag{3.2}$$

Используя условие равновесия элемента волокна

$$\tau=\delta\frac{d\sigma_{\text{в}}}{dz} \tag{3.3}$$

а также очевидное условие $\frac{d\sigma_{\text{уср}}}{dz}=0$, получим следующее уравнение:

$$\frac{d^2\tau}{dz^2}-\eta^2\tau=0,\qquad \eta=\sqrt{\frac{G_c}{\Delta E_{\text{в}}\delta}} \tag{3.4}$$

Решая уравнения (3.4) и (3.3) при краевых условиях $\tau|_{z\to\infty}=0$, $\sigma_{\text{в}}|_{z=0}=0$, $\sigma_{\text{в}}|_{z\to\infty}=\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}$, получим

$$\sigma_{\text{в}}=\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}\left(1-\exp\left(-\sqrt{\frac{G_c}{\Delta E_{\text{в}}\delta}}\,z\right)\right)$$

$$\tau=\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}\sqrt{\frac{G_c\delta}{\Delta E_{\text{в}}}}\exp\left(-\sqrt{\frac{G_c}{\Delta\delta E_{\text{в}}}}\,z\right) \tag{3.5}$$

при этом

$$\tau_{\max}=\tau\Big|_{z=0}=\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}\sqrt{\frac{G_c\delta}{\Delta E_{\text{в}}}}\simeq\sigma_{\text{уср}}\sqrt{\frac{G_c}{E_{\text{в}}}}\sqrt{\frac{1}{\psi(1-\psi)}} \tag{3.6}$$

формулы (3.5) и (3.6) имеют место в случае упругого поведения связующего. В случае же проявления пластических свойств значения напряжений τ будут меньшими, то есть если адгезионная прочность и прочность связующего на сдвиг превышает значение (3.6), то опасность распространения продольной трещины и постепенного выключения всего волокна из работы не имеет места. Заменим напряженное состояние волокна ступенчато-изменяющимся (на фиг. 4 показано штриховыми линиями) путем смещения напряжений вдоль волокна так, чтобы площадь эпюры напряжений была бы той же, что обеспечило бы адекватность вклада волокна в восприятии композитом внешней нагрузки. При этом длина условно ненагруженной части волокна L, которую будем считать длиной неэффективной части волокна, определится по формуле

$$L=\frac{\int\limits_0^{\infty}\left(\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}-\sigma_{\text{в}}(z)\right)dz}{\frac{\sigma_{\text{уср}}}{\psi}}=\sqrt{\frac{\delta\Delta E_{\text{в}}}{G_c}} \tag{3.7}$$

4. Рассмотрим теперь процесс разрушения композита. Образец из композита представим составленным из звеньев с длиной $2L$, каждое из которых представляет собой систему параллельно соединенных искривленных волокон, находящихся в матрице связующего; при этом будем полагать, что разрыв волокна приводит к выключению его из работы в пределах звена, не влияя на его напряженное состояние вне пределов звена.

При этом для любого из звеньев соотношение (2.2) заменится следующим:

$$\sigma = \varepsilon \frac{\psi F_{в}}{N} \sum_{n} \left(1 + \frac{\pi \delta h_i (1-\mu_c^2)}{2Rl} \frac{E_{в}}{E_c} \right)^{-1} \tag{4.1}$$

где суммирование проводится по n элементам i, для которых выполняется условие

$$P_{в} \leqslant [\sigma_{в}] F_{в}$$

гее $[\sigma_{в}]$ — прочность волокон, или, что то же,

$$\frac{h_i}{l} \geqslant 2 \left(\varepsilon - \frac{[\sigma_{в}]}{E_{в}} \right) \frac{RE_c}{\pi \delta [\sigma_{в}] (1-\mu_c^2)} \tag{4.2}$$

Устремляя число N волокон к бесконечности, получим

$$\sigma = \varepsilon \frac{2RE_c \psi}{\pi \delta (1-\mu_c^2)} \int_0^{\infty} \rho \left(\frac{2RE_c x}{\pi \delta E_{в} (1-\mu_c^2)} \right) \frac{dx}{1+x}, \quad \varepsilon < \frac{[\sigma_{в}]}{E_{в}}$$

$$\sigma = \varepsilon \frac{2RE_c \psi}{\pi \delta (1-\mu_c^2)} \int_{\frac{E_{в}\varepsilon}{[\sigma_{в}]}-1}^{\infty} \rho \left(\frac{2RE_c x}{\pi \delta E_{в} (1-\mu_c^2)} \right) \frac{dx}{1+x}, \quad \varepsilon > \frac{[\sigma_{в}]}{E_{в}} \tag{4.3}$$

Эти соотношения описывают деформационное поведение композита для любого слоя, а следовательно, и для всего образца в целом, если прочность волокна $[\sigma_{в}]$ детерминирована, то есть можно пренебречь разбросом его экспериментальных значений или, что то же, прочность волокна не зависит от его длины. Разрушение композита будет иметь место при достижении деформации $\varepsilon_{пред.}$, при которой соблюдается условие $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$, что соответствует условию

$$\int_{\frac{E_{в}\varepsilon_{пред.}}{[\sigma_{в}]}-1}^{\infty} \rho \left(\frac{2RE_c x}{(1-\mu_c^2)\pi \delta E_{в}} \right) \frac{dx}{1+x} = \rho \left[\frac{2RE_c}{\pi \delta E_{в} (1-\mu_c^2)} \left(\frac{E_{в}\varepsilon_{пред.}}{[\sigma_{в}]} - 1 \right) \right] \tag{4.4}$$

Значение прочности композита σ_k определяется по формуле

$$\sigma_k = \varepsilon_{пред.} \frac{2RE_c \psi}{\pi \delta (1-\mu_c^2)} \rho \left[\frac{2RB_c}{\pi \delta E_{в} (1-\mu_c^2)} \left(\frac{E_{в}\varepsilon_{пред.}}{[\sigma_{в}]} - 1 \right) \right] \tag{4.5}$$

где $\varepsilon_{\text{пред.}}$ удовлетворяет условию (4.4).

Положим, что прочность волокна имеет разброс. Пусть $g_l(|\sigma|)$—плотность распределения прочности волокна, имеющего некоторую длину l. Аналогично [3], можно сказать, что плотность распределения прочности волокна с длиной $2L$ определится по формуле

$$g_{2L}(|\sigma|)=\frac{2L}{l}\, g_l(|\sigma|)\left|\int\limits_{|\sigma|}^{\infty} g_l(x)dx\right|^{\frac{2L}{l}-1} \tag{4.6}$$

Условие (4.2) теперь может рассматриваться лишь в вероятностном аспекте. Можно сказать, что плотность распределения правой части (4.2) $y=\dfrac{2RE_c}{\pi\delta|\sigma_{\text{в}}|(1-\mu_c^2)}\left(\varepsilon-\dfrac{|\sigma_{\text{в}}|}{E_{\text{в}}}\right)$ определится по формуле

$$\varphi_{2L}(y,\varepsilon)=\frac{2RE_c\varepsilon}{\pi\delta\left(\dfrac{2RE_c}{\pi\delta E_{\text{в}}(1-\mu_c^2)}+y\right)^2(1-\mu_c^2)}\, g_{2L}\left(\frac{E_{\text{в}}\varepsilon}{1+y(1-\mu_c^2)\,\dfrac{\pi\delta E_{\text{в}}}{2RE_c}}\right) \tag{4.7}$$

Основное соотношение (4.1) запишется так:

$$\sigma=\psi E_{\text{в}}\varepsilon\int\limits_0^{\infty}\frac{\rho(x)}{1+\dfrac{\pi\delta E_{\text{в}}(1-\mu_c^2)x}{2RE_c}}\int\limits_0^x\varphi_{2L}(y,\varepsilon)dydx \tag{4.8}$$

Формула (4.8) описывает деформационные свойства при растяжении вдоль волокон однонаправленно-армированного композита вплоть до разрушения в зависимости от упругих свойств наполнителя и связующего, разброса в прочности волокна, определяемой плотностью распределения $g_{2L}(|\sigma|)$, от криволинейности волокон, определяемой плотностью распределения $\rho\left(\dfrac{h}{l}\right)$ и от длины L неэффективной части волокна. Прочность композита может быть определена по формуле (4.8), где вместо ε подставляется значение его, соответствующее выполнению условия $\dfrac{d\sigma}{d\varepsilon}=0$. При этом, естественно, адгезионная прочность соединения волокна со связующим должна превосходить значение (3.6).

5. Полученные результаты позволяют сделать некоторые рекомендации по изготовлению композита. Использование связующего с высоким модулем упругости на сжатие приводит к более равномерному вовлечению волокон в работу при растяжении и, как это вытекает из формулы (2.2), к повышению модуля упругости и прочности композита. С другой стороны, у высокомодульного связующего обычно велик и модуль сдвига, что приводит к увеличению касательного напряжения (3.6) в окрестности разорванного волокна, что угрожает распространению трещины параллельной армированию. Таким образом, использование более жесткого связующего имеет смысл при обеспечении достаточно высокой адгезионной прочности и прочности связующего на

сдвиг. Как вытекает из формулы (3.6), уменьшение касательных напряжений τ_{m33} может быть достигнуто также увеличением модуля упругости наполнителя E_s или приближением коэффициента армирования ψ к 0,5. При этом, однако, согласно формуле (3.7), увеличивается длина неэффективной части L, что, как это видно из формулы (4.6), приводит к смещению $g_{2L}(|\tau|)$, а следовательно, и $\rho_{2L}(y, \varepsilon)$, согласно (4.7), влево. Чем меньше разброс данных о прочности волокон, тем меньше влияние L на деформационные и прочностные свойства композита.

Если модули упругости у связующего относительно невелики, то, вследствие относительно высоких значений L важно иметь наполнитель по возможности однородный по длине, например, в виде волокон большого диаметра, при этом опасность возникновения трещины вдоль волокна незначительна.

Плотность распределения непрямолинейности $\rho\left(\frac{h}{l}\right)$ может регулироваться шириной натягиваемой ленты; на него влияет также и усилие натяга при намотке или укладке. Прессование, естественно, на функцию $\rho\left(\frac{h}{l}\right)$ не влияет. Практическое определение $\rho\left(\frac{h}{l}\right)$ соответственно тому или иному технологическому режиму, вообще говоря, затруднительно, но может быть осуществлено с помощью местного выжигания композита и определения свободных поперечных перемещений волокон на выжженной длине. Определение $g_l(|\sigma|)$ может быть осуществлено на основе гистограммы прочности, построенной на образцах волокон или групп волокон с длиной l.

STRAIN AND STRENGTH MODEL OF FIBROUS COMPOSITS TAKING ACCOUNT CURVATURE OF FILAMENTS

A. M. SIMONIAN

ԹԵԼԻԿԱՅԻՆ ԿՈՄՊՈԶԻՏԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑՄԱՆ ԵՎ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ՄՈԴԵԼԸ ԹԵԼԻԿՆԵՐԻ ՈՉ ՈՒՂՂԱԳԾՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՌՈՒՄՈՎ

Ա. Մ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ

Ամփոփում

Կառուցվում է թելիկային կոմպոզիտի դեֆորմացման և քայքայման մոդելը։ Ընդունվում է, որ լցանյութը սկզբնապես ծռված թելիկների համակարգ է, որն ընդունում է ամբողջ արտաքին բեռը, ընդ որում կապակցողն արգելակում է թելիկների ուղղմանը՝ օժանդակելով նրանց ներգրավմանը աշխատանքի մեջ։ Ընդունելով, որ թելիկների քանակն անսահմանափակ մեծ է, կոմպոզիտի դեֆորմատիվ և ամրային հատկությունների նկարագրման

համար կառուցվում են որոշ առնչություններ՝ թելիկների տարածական և ամրային հատկությունների հիման վրա, հաշվի առնելով սահմանափակորեն տրված կորագծով նրանց ցրվածությունը, ինչպես նաև կապակցողի տարածական և սահքի ամրության հատկությունները։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Скудра А. М., Булавс Ф. Я.* Прочность армированных пластиков.—М.: Химия, 1982. 213 с.
2. *Гузь А. Н.* О континуальной теории композитных материалов с мелкомасштабными искривлениями в структуре.—Докл. АН СССР. 1983, 268, №2, с. 307—313.
3. *Розен Б.* Механика упрочнения композиций. ст. Волокнистые композиционные материалы.—М.: Мир, 1967, с. 54—97.

СКТБ КМ АН Армении

Поступила в редакцию
6.IX.1989