

УДК 621.763.011

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Л. М. УСТИНОВ, М. Х. ШОРШОРОВ, Ю. Г. КУЗНЕЦОВ

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ АРМИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ ХРУПКИМИ ВОЛОКНАМИ

(Представлено академиком Н. Н. Рыкалинным 30 VII 1974)

В волокнистых композиционных материалах на металлической основе с относительно большими объемными долями армирующей фазы и с длиной волокон l_f больше критической $l_{кр}$, определяемой выражением (1)

$$l_{кр} = \sigma_f d_f / 2\tau_m^*, \quad (1)$$

разрушение при растяжении происходит непосредственно после массового разрушения волокон. Здесь σ_f — прочность волокон на разрыв, d_f — диаметр волокон, а $2\tau_m^* = \sigma_m^*$ — прочность матрицы на разрыв.

Волокна, используемые в композициях с металлической матрицей, имеют удлинение до разрушения намного меньшее, чем армируемые ими матрицы. Так, например, перспективные высокопрочные и высокомодульные волокна бора, карбида кремния и окиси алюминия имеют удлинение до разрушения ϵ_p , не превышающее 1%. Поэтому композиции, армируемые этими волокнами с длиной больше критической и с объемными долями большими минимальной, обычно разрушаются при удлинении одного порядка величины с ϵ_p .

Низкая пластичность композиций с хрупкими волокнами является одним из основных их недостатков, сдерживающих применение этих материалов в конструкциях и изделиях.

Для радикального повышения пластичности композиций необходимо полностью исключить разрушение волокон из общего процесса разрушения материала. Этого можно достигнуть, если использовать в качестве армирующей фазы дискретные волокна, длиной меньше критической. В таких волокнах в соответствии с эпюрой распределения в них растягивающих напряжений, возникающих при нагружении композиции (1, 2), максимальное напряжение, равное $(l_f/l_{кр})\sigma_f$, будет меньше предела прочности волокон на разрыв при любом удлинении композиции вплоть до ее разрушения. Разрушение композиции будет происходить только за счет вязкого разрушения матрицы и выдергивания из нее армирующих волокон исходной длины l_f . Пластичность композиции будет ограничиваться удлинением до разрушения матрицы. Соответственно прочность композиции σ_c определяется выражением (1)

$$\sigma_c = \sigma_m^* (1 - V_f) + \frac{l_f}{l_{кр}} \frac{\sigma_f}{2} V_f, \quad (2)$$

где σ_m^* — прочность матрицы на разрыв, а V_f — объемная доля волокон.

Уравнение (2) применимо лишь в случае соблюдения условия $0 < l_f < l_{кр}$. При $l_f \geq l_{кр}$ композиции разрушаются хрупко по механизму, в соответствии с которым после массового разрушения волокон непосредственно следует пластический отрыв матрицы. Пластичность композиции при этом ограничивается удлинением до разрушения волокон и не превышает

1–2% ϵ_p . Прочность композиции, претерпевающей хрупкое разрушение, определяется выражением (1, 2)

$$\sigma_c = \sigma_m^{**}(1 - V_f) + \sigma_f [1 - k(1 - n)] V_f, \quad (3)$$

где σ_m^{**} — напряжение на матрице в момент разрушения композиции, $n \approx 0,5$; $k = l_{кр}/l_f$.

Таким образом, критическую длину волокна можно считать длиной перехода от пластичного разрушения композиции к хрупкому.

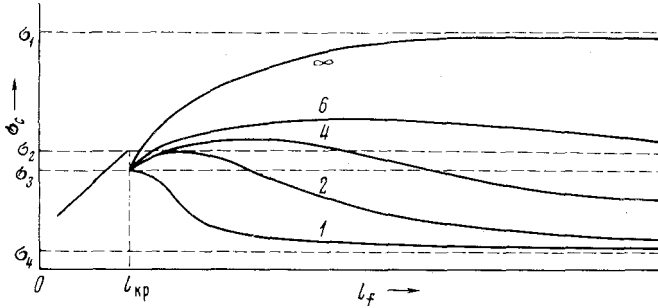


Рис. 1. Зависимость прочности композиций от длины хрупких армирующих волокон при $V_f = \text{const}$ и $l_{кр} = \text{const}$. $\sigma_1 = \sigma_m^{**}(1 - V_f) + \sigma_f(l_2)V_f$, $\sigma_2 = \sigma_m^{**}(1 - V_f) + 0,5 \sigma_f(l_2)V_f$, $\sigma_3 = \sigma_m^{**}(1 - V_f) + 0,5 \sigma_f(l_2)V_f$, $\sigma_4 = \sigma_m^{**}(1 - V_f)$. Цифры у кривых — значения β

Экспериментальные данные показывают, что прочность хрупких волокон обычно описывается кривой weibullовского распределения. Известно, что с уменьшением расчетной длины испытываемого на разрыв хрупкого волокна, прочность его возрастает в соответствии с выражением

$$\frac{\sigma_f(l_1)}{\sigma_f(l_2)} = \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^{1/\beta}, \quad (4)$$

где $\sigma_f(l_1)$ и $\sigma_f(l_2)$ — прочность на разрыв хрупких волокон с расчетной длиной l_1 и l_2 соответственно, а β — weibullовский коэффициент распределения прочности волокон. Поэтому, используя в качестве армирующей фазы хрупкие волокна длиной меньше критической, в принципе можно сократить и даже превзойти тот эффект упрочнения матрицы, который обычно достигается в случае армирования ее непрерывными волокнами того же типа и сортности. Попробуем доказать это.

Представим графически характер изменения прочности композиции в функции длины армирующего хрупкого волокна при условии постоянства V_f и $l_{кр}$ (рис. 1). Левая ветвь кривой описывается уравнением (2) (здесь $l_{кр} = l_2$, $l_f = l_3 < l_2$, а $\sigma_f = \sigma_f(l_2)$), а правые — уравнением (3) (в этом случае $\sigma_f = \sigma_f(l_1) = \sigma_f(l_2) \cdot (l_2/l_1)^{1/\beta}$, $l_{кр} = l_2$, $l_f = l_1 \geq l_2$). Очевидно, прочность композиций с волокнами длиной l_3 , достаточно близкой к $l_{кр}$, может оказаться выше прочности композиций с волокнами длиной больше $l_{кр}$.

Учитывая тот факт, что прочность хрупких волокон возрастает с уменьшением их расчетной длины l_1 , необходимо внести коррективы в широко используемую формулу (1) расчета критической длины волокна. Подставив в выражение (1) вместо σ_f значение $\sigma_f(l_2)$, найденное из уравнения (4), а также учитывая, что $l_{кр} = l_2$, получим формулу расчета критической длины хрупких волокон

$$l_{кр} = \left[\frac{\sigma_f(l_1) \cdot l_1^{1/\beta} d_f}{2\tau_m} \right]^{1/(1+\beta)} \quad (5)$$

При условии равнопрочности композиций с волокнами больше критической длины и меньше критической длины из выражений (2) и (3) можно вывести формулу зависимости коэффициента β от V_f (при выводе рассматривался предельный случай, когда l_f в уравнении (2) равно $l_{кр}$):

$$\beta = \frac{\lg(l_1/l_2)}{\lg 2 \left(1 + \frac{\Delta\sigma_m}{\sigma_f(l_1)} - \frac{\Delta\sigma_m}{\sigma_f(l_1)V_f} \right)}. \quad (6)$$

На рис. 2 показана зависимость β от V_f , из которой видно, что с увеличением объемной доли армирующей фазы условие равнопрочности будет соблюдаться при все более убывающей величине β . Из уравнения (6) можно вывести зависимость V_f от β , по которой можно судить об объемной доле армирующих волокон, которая при данном значении β обеспечивает равнопрочность композиций с волокнами меньше критической длины и больше ее.

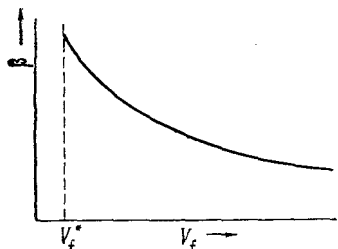


Рис. 2. Зависимость коэффициента β от V_f при условии соблюдения равнопрочности композиций, армированных волокнами меньше и больше критической длины. $V_f^* = [\sigma_f(l_1) / (2\Delta\sigma_m + 1)]^{-1}$, где $\Delta\sigma_m = \sigma_m^* - \sigma_m^{**}$

Приведем конкретный пример*. Предположим, композиция армирована волокнами сорта Б, имеющими следующие данные: $\sigma_f(l_1) = 250$ кг/мм² при $l_1 = 20$ мм, $d_f = 0,09$ мм; $\beta = 6,00$; $V_f = 0,5$, а $\sigma_m^* = 47$ кг/мм². Расчет $l_{кр} = l_2$ по формулам (1) и (5) дает соответственно значения 0,483 и 0,872 мм. Прочность волокна при $l_2 = 0,872$ мм, рассчитанная по формуле (4), равна 430 кг/мм², т. е. расчет $l_{кр}$ по традиционной формуле (1) может дать сильно заниженные значения критической

длины хрупких волокон по сравнению с ее фактической величиной. Армирование композиций волокнами длиной l_f меньше $l_{кр}$ (в расчете принимаем для удобства $l_f = l_{кр}$) и больше критической ($l_1 = 20$ мм) при соблюдении указанных выше условий, а также, что $n \approx 0,5$, а $\sigma_m^{**} = 25$ кг/мм², дает соответственно прочность их на разрыв, равную 131 и 137 кг/мм².

Таким образом, путем оптимизации дискретной волокнистой структуры композиции с металлической матрицей, армированной хрупкими волокнами, при прочих равных условиях можно в принципе повысить ее пластичность до пластичности матрицы с одновременным сохранением или превышением прочности композиций, армированных волокнами того же сорта с длиной больше критической. При этом можно добиться резкого повышения вязкости разрушения композиций и улучшения стабильности показаний их прочности.

Институт металлургии им. А. А. Байкова
Академия наук СССР
Москва

Поступило
25 VII 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ A. Kelly, G. J. Davies, Metallurg. Rev., v. 10, № 37, 1 (1965). ² A. Kelly, W. R. Tyson, J. Mech. and Phys., Solids, v. 13, № 6, 329 (1965). ³ С. Т. Мулейко, Н. М. Соколин, А. М. Цирлин, Механика полимеров, № 5, 840 (1973).

* Исходные расчетные данные взяты из экспериментальной работы (3).