УДК 620.1 + 539.4

Каледина Н. Б., старший преподаватель

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГИИ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ С ДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

The adequate model is received as a polynom of 2-nd order. It allows to establish quantitative communication between energy of destruction, the volumetric maintenance of disperse particles and their size in composite materials with disperse particles. On the given model it is possible to define optimum reception conditions of a composite with high destruction energy.

Энергия разрушения определяется либо как работа, необходимая для образования единицы новой поверхности трещины, либо как энергия, поглощенная вновь образованной поверхностью разрушения и приходящаяся на единицу площади [1].

При вычислении энергии разрушения необходимо знать силу, требуемую для развития острой трещины, ее длину, модуль упругости материала, размеры образца и соответствующее уравнение, связывающее эти параметры. Можно сказать, что прочность материала определяется тремя факторами: энергией разрушения γ, модулем упругости E и размером трещины C. Важное значение этого соотношения состоит в том, что появляется возможность проанализировать прочность материала в зависимости от этих факторов. Для объяснения прочностных свойств композитов с дисперсными частицами необходимо исследовать влияние дисперсной фазы на каждый из указанных факторов.

Известно, что вторая дисперсная фаза влияет на энергию разрушения хрупкой матрицы тремя путями. Один из них связан с пластической деформацией вследствие высоких напряжений около фронта трещины, и эта деформация поглощает энергию при развитии трещины. Следует предположить, что развитие трещины во всех материалах сопровождается некоторой пластической деформацией, поскольку энергия разрушения даже наиболее хрупких материалов больше присущих им поверхностных энергий.

Второй эффект дисперсной фазы состоит в увеличении шероховатости поверхности разрушения вследствие нерегулярной траектории продвижения трещины. Третий эффект обусловлен взаимодействием трещины и второй дисперсной фазы.

Для установления связи между энергией разрушения эпоксидной смолы и объемным содержанием дисперсных частиц был проведен эксперимент по плану 3×3, где 3 — три уровня объемного содержания V дисперсных частиц $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ (0; 0,2; и 0,4) и три уровня размера этих частиц (1; 6,5; 12 мкм).

Матрица плана и результаты измерения энергии разрушения ($y = \gamma$) приведены в табл. 1. Ошибки воспроизводимости опытов S составляли 0,6 (5% от среднего уровня y). $y = \gamma \cdot 10^4$ эрг/см^2.

В табл. 1 x_1 и x_2 — кодированные уровни факторов, определяемые по формуле

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - 0{,}5(\tilde{x}_{i\,\max} - \tilde{x}_{i\,\min})}{0{,}5(\tilde{x}_{i\,\max} - \tilde{x}_{i\,\min})}, \qquad (1)$$

где x_i — кодированный уровень i-го фактора (у нас –1; 0; +1); $\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i\,\max}, \tilde{x}_{i\,\min}$ — текущее, максимальное и минимальное значения i-го фактора в натуральных единицах.

Обработку результатов эксперимента проводили по методике работы [2].

Значения коэффициентов уравнения определялись по формуле (2).

$$\left.\begin{aligned} b_0 &= a_0(0y) - a_{01}(11y) - a_{02}(22y) \\ b_i &= a_i(iy) \\ b_{ij} &= a_{ij}(ijy) \\ b_{ii} &= a_{ii}(iiy) - a_{0i}(0y) \end{aligned}\right\}, \qquad (2)$$

Таблица 1

Матрица плана 3×3

¹ ї/ї	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	$y'_э$	$y_р$	$y'_р$	$y''_э$	$y''_р$
1.	–1	–1	+1	+1	+1	8,3	7,7	7,5	70	70
2.	–1	0	0	+1	0	9,5	10,1	9,9	70	72,5
3.	–1	+1	–1	+1	+1	11,9	12,5	12,3	70	75
4.	0	–1	0	0	+1	13,3	13,9	14.8	50	57,5
5.	0	0	0	0	0	18,2	18,4	18,6	70	72,5
6.	0	+1	0	0	+1	23,5	22,9	22,4	90	87,5
7.	+1	–1	–	+1	+1	4,1	3,5	4,7	16	19,6
8.	+1	0	0	+1	0	10,8	10,1	9,9	52	47,1
9.	+1	+1	+1	+1	+1	13,1	12,5	15,1	66	70,6

где b_0 — свободный член уравнения; b_i — коэффициент при x_i; b_{ij} — коэффициент при взаимодействии $x_i x_j$; b_{ii} — коэффициент при квадратичных членах уравнения x_i^2; a_0, a_{01}, a_{02}, a_i, a_{ij}, a_{ii} — коэффициенты из таблицы 2.18 [2]; (0*y*), (*iy*), (*ijy*), и (*iiy*) — алгебраические суммы произведений столбца *y* на соответствующие столбцы матрицы; величина (0*y*) находится по следующей формуле, в которой *n* — номер строки матрицы:

$$(0y) = \sum_{n=1}^{N} y_n \, .$$

Для плана 3×3 a_0=0,55556; $a_{01} = a_{02} = 0{,}33333$; $a_1 = a_2 = 0{,}16667$; $a_{12} = 0{,}25$; $a_{11} = a_{22} = 0{,}5$.

Значимость коэффициентов уравнения b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} определяли путем сравнения их абсолютных значений с доверительными интервалами Δb_0, Δb_i, Δb_{ij}, Δb_{ii}, которые определяли по формулам:

$$\left.\begin{aligned} \Delta b_0 &= t \cdot S\sqrt{a_0} \\ \Delta b_i &= t \cdot S\sqrt{a_i} \\ \Delta b_{ij} &= t \cdot S\sqrt{a_{ij}} \\ \Delta b_{ii} &= t \cdot S\sqrt{a_{ii}} \end{aligned}\right\}, \tag{3}$$

где *t* — критерий Стьюдента, берущийся из статистических таблиц (в нашем случае $t = 2{,}262$ при $\alpha = 0{,}05$ и $f = 9$); *S* — средняя квадратичная ошибка опытов (у нас $S = 0{,}6$).

После обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель в виде полинома 2-го порядка.

$$y = \gamma = 18{,}6 + 3{,}8x_2 + 1{,}4x_1x_2 - 8{,}7x_1^2 . \tag{4}$$

Проверку адекватности модели (4) проводим по известной схеме: рассчитываем расчетное значение $y_р$ по уравнению (4), находим разность между экспериментальным и расчетным значениями, т. е. $\Delta y_n = y_э - y_р$; возводили ее в квадрат и суммировали эти квадраты разностей. Затем по формуле (5) находили дисперсии адекватности $S^2_{ад}$.

$$S^2_{ад} = \frac{\sum_{n=1}^{N} \Delta y_n^{\,2}}{N - m}, \tag{5}$$

где *m* — число значимых коэффициентов в уравнении (4), включая b_0.

Наконец, по критерию Фишера $F = S^2_{ад}/S^2_y$ (S^2_y — дисперсия параметра оптимизации *y*, т. е. S^2) определяли адекватность уравнения, сравнивая расчетное значение $F_р$ с табличным $F_{кр}$ при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ или $\alpha = 0{,}01$ и степенях свободы $f_1 = N - m$ (для дисперсии $S^2_{ад}$) и $f_2 = N - 1$.

В нашем случае $S^2_{ад} = 1{,}95$ и $F_р = 5{,}42$, что меньше $F_{кр} = 6{,}42$ (при $\alpha = 0{,}01$, $f_1 = 5$ и $f_2 = 8$).

Как видно из уравнения (4), наибольшее влияние оказывает на энергию разрушения ($y = \gamma$) объемное содержание дисперсных частиц (x_1), влияние размера частиц (x_2) несколько меньше. Максимальная величина $y = 23{,}5 \cdot 10^4$ эрг/см^2 будет при $x_1 = 0$ и $x_2 = +1$, т. е. при объемном содержании частиц 0,2 и размере частиц 12 мкм.

Уменьшение энергии разрушения ниже этого максимума объясняется неэффективным взаимодействием при близком расположении частиц, т. е. когда частицы расположены слишком близко друг к другу, композит представлял собой сплошную среду и фронт трещины не взаимодействовал с отдельными частицами. Таким образом, наибольший размер дисперсных частиц приводит к максимальному увеличению энергии разрушения.

Исследование влияния на энергию разрушения матрицы из нитрида кремния с дисперсными частицами из карбида кремния объемного содержания этих частиц (0; 0,2 и 0,4) и их размера (5; 13,5 и 32 мкм) проводили по тому же плану. Результаты этого эксперимента приведены в двух последних столбцах табл. 1. Ошибка воспроизводимости опытов в этом случае составляла 3,73 10^3 эрг/см^2 (6% от среднего значения параметра оптимизации $\bar{y}'' = 61{,}6 \cdot 10^4$ эрг/см^2).

После обработки результатов и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель

$$y''_р = 72{,}45 - 12{,}7x_1 + 15x_2 + 12{,}5x_1x_2 - 12{,}7x_1^2 . \tag{6}$$

Из этого уравнения видно, что наибольшее влияние на энергию разрушения композита $Si_3N_4 \cdot SiC$ оказывает объемное содержание дисперсных частиц карбида кремния (SiC). Влияние размера частиц (x_2) слабее, но с его увеличением энергия разрушения возрастает.

Максимальная величина $\gamma = 90 \cdot 10^3$ эрг/см^2 получена при $x_1 = 0$ и $x_2 = +1$, т. е. при $V = 0{,}2$ и $d = 32$ мкм.

Из табл. 1 и уравнения (6) видно, что, как и в предыдущем примере, с увеличением размера частиц до 32 мкм растет и энергия разрушения по сравнению с энергией разрушения матрицы (при $V = 0$, т. е. $x_1 = -1$). Другие композиты со средним и малым размером частиц (13,5 и 5 мкм) обладают меньшей энергией разрушения. Эти результаты можно объяснить тем, что фронт трещины может взаимодействовать только с частицами, которые больше размера зерна матрицы, т. е. частицы, имеющие размер, близкий к размеру зерна матрицы, не могут задерживать движение трещины. Поскольку энергия разрушения нитрида кремния в два–четыре раза больше, чем для других керамик, частицы карбида кремния уменьшают количество матрицы, пересекаемой плоскостью трещины, и, таким образом, снижают энергию разрушения по сравнению с энергией разрушения матрицы Si_3N_4.

Этим объясняется появление максимума, характерного для ряда композитов с дисперсными частицами большого размера. Можно предположить, что энергия разрушения этих композитов зависит от двух конкурирующих особенностей: первая вызывала увеличение энергии разрушения вследствие взаимодействия фронта трещины с дисперсной фазой, а вторая приводила к ее уменьшению вследствие ослабления матрицы дисперсными частицами. Поэтому можно сделать вывод, что хрупкая дисперсная фаза может привести к увеличению энергии разрушения поликристаллической матрицы в том случае, когда размер дисперсных частиц существенно больше размера зерна матричной среды.

Литература

1. Браун У., Строули Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. — М.: Мир, 1972. — 205 с.
2. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. — М.: Статистика, 1981. — 264 с.