

С. А. ГАСПАРЯН, В. В. МИКАЕЛЯН, К. В. ОГАНЕСЯН, Б. А. АРЕФЬЕВ

ИЗМЕРЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВОЛОКНИСТЫХ БОРАЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТАХ

Одним из методов измерения остаточных напряжений, позволяющих количественно оценить распределение их по глубине материала, является травление образца, при котором по мере удаления слоя происходит его изгиб. Расчетные зависимости для определения остаточных напряжений способом замера прогиба образца и деформации при помощи тензодатчиков, наклеиваемых на его нижней грани, и их выводы приведены в [1].

Выводы этих зависимостей построены для металлов и сплавов, у которых процесс травления происходит по всей ширине и вглубь образца непрерывно. Для композиционных материалов непосредственное использование этих зависимостей в конечном виде невозможно, потому что композит состоит из двух разнородных физико-химических фаз-компонент с разной степенью растворимости в выбранном раствори-теле.

Исходя из этого, представляется целесообразным построение подобных зависимостей для расчета остаточных напряжений при измерении их вышеупомянутыми двумя способами на основе тех же предпосылок, но с учетом следующих особенностей. При травлении образца снимается слой алюминиевой матрицы, борное волокно остается. Следовательно, при последовательном удалении слоя матрицы и раскрытии волокна снимаются остаточные напряжения, возникшие между волокном и матрицей по толщине волокна. Предполагая, что волокна распределены равномерно в матрице, а процессе изготовления композита протекал при таком стационарном режиме, что остаточное напряженное состояние не изменяется по всей длине и толщине композита, можно считать, что распределение остаточных напряжений повторяется для каждого слоя толщиной в одно волокно.

Образец из композита можно считать состоящим из отдельных элементов, содержащих одно волокно, окруженное матрицей (рис. 1). В поперечном сечении образца эти элементы представляются в виде квадратов с определенным размером, если известен диаметр и шаг расположения волокон, коэффициент объемной доли волокна или матрицы и размеры образца. Значения и характер распределения остаточных

напряжений в матрице будут повторяться для каждого элемента и иметь симметричное расположение относительно центра элемента (волокна). Следовательно, при измерении достаточно рассмотреть верхний слой по толщине, равной половине высоты одноволокинистого элемента.

На основе этого приводится вывод расчетных зависимостей определения остаточных напряжений способом замера деформаций при помощи тензодатчиков.

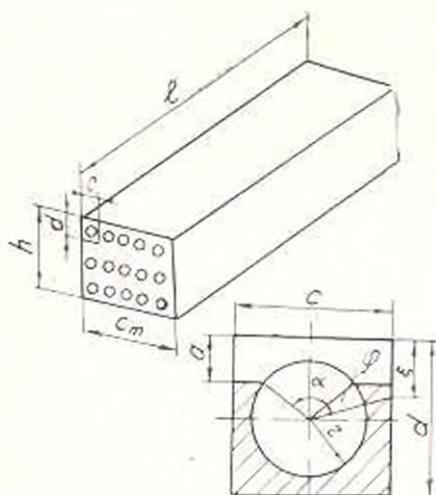


Рис. 1.

Так как при $0 < a < \frac{d}{2} - r$ оставшаяся часть поперечного сечения стержня является прямоугольной областью, то можно использовать следующую формулу для определения остаточных напряжений [1]:

$$\sigma(a) = -\frac{1}{2} E (h-a) \frac{d\varepsilon(a)}{d(a)} + 2E \varepsilon(a) - 3E (h-a) \int_0^a \frac{\varepsilon(\xi) d\xi}{(h-\xi)}, \quad (1)$$

где E — приведенный модуль упругости композита; a — расстояние снимаемого слоя от нижней грани стержня.

В случае $\frac{d}{2} - r < a < \frac{d}{2}$ продолжается удаление слоя матрицы, волокно не удаляется и для этого целесообразно применять формулы определения остаточных напряжений для стержня произвольного сечения [1]:

$$\sigma(a) = -E \left\{ \frac{1}{\left[\frac{(h-a-l(a)) b(a)}{J(a)} - \frac{1}{F(a)} \right] \delta(a)} \times \right. \\ \left. \times \frac{d\varepsilon(a)}{d(a)} - \int_0^a \lambda(\xi) \frac{d\varepsilon}{d\xi} d\xi \right\}. \quad (2)$$

где

$$\lambda(\xi) = \frac{\frac{h-\xi - l(\xi)}{J(\xi)} (h-a - l(\xi)) + \frac{1}{F(\xi)}}{\frac{h-\xi - l(\xi)}{J(\xi)} l(\xi) - \frac{1}{F(\xi)}}; \quad (3)$$

$J(a)$ ($J(\xi)$) — момент инерции поперечного сечения относительно оси, проходящей через центр тяжести поперечного сечения; $l(a)$ ($l(\xi)$) — расстояние центра тяжести поперечного сечения до нижней поверхности; $F(a)$ ($F(\xi)$) — площадь сечения стержня после удаления слоя глубиной $d(\xi)$.

При вычислении интеграла, входящего в формулу (2), следует интервал интегрирования $(0; a)$ разбить на две части: первый $(0; \frac{d}{2} - r)$ и второй $(\frac{d}{2} - r; a)$ —

$$\int_0^a \lambda(\xi) \frac{d\xi}{d\xi} d\xi = \int_0^{\frac{d}{2}-r} \lambda(\xi) \frac{d\xi}{d\xi} d\xi + \int_{\frac{d}{2}-r}^a \lambda(\xi) \frac{d\xi}{d\xi} d\xi.$$

Учитывая, что при $(0 < \xi < \frac{d}{2} - r)$ область поперечного сечения является прямоугольной, т. е.

$$l(\xi) = \frac{1}{2} (h - \xi), \quad J(\xi) = \frac{(h - \xi)^2 b}{12}, \quad F(\xi) = (h - \xi) b,$$

после некоторых преобразований запишем:

$$\int_0^{\frac{d}{2}-r} \lambda(\xi) d\xi = \left\{ \varepsilon \left(\frac{d}{2} - r \right) \left(\frac{3(h-a)}{h - \left(\frac{d}{2} - r \right)} - 1 \right) - 3(h-a) \int_0^{\frac{d}{2}-r} \frac{\varepsilon(\xi) d\xi}{(h-\xi)^2} \right\}. \quad (4)$$

Используя (2) и (4), получим:

$$\begin{aligned} \sigma(\bar{a}) = -E & \left[\frac{1}{\left| \frac{(h-a) - l(a) b(a)}{J(a)} - \frac{1}{F(a)} \right| b(a)} \cdot \frac{d\varepsilon(a)}{d(a)} \right. \\ & - \left[\varepsilon \left(\frac{d}{2} - r \right) \left(\frac{3(h-a)}{h - \left(\frac{d}{2} - r \right)} - 1 \right) - \right. \\ & \left. \left. - 3(h-a) \int_0^{\frac{d}{2}-r} \frac{\varepsilon(\xi) d\xi}{(h-\xi)^2} \int_{\frac{d}{2}-r}^a \lambda(\xi) \frac{d\xi}{d\xi} d\xi \right] \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

В формуле (5) следует использовать следующие значения для $J(a)$, $I(a)$, $F(a)$ и $b(a)$:

$$b(a) = c - 4r^2 - (d - 2a)^2; \quad (6)$$

$$F(a) = (h - a)c + r^2\alpha - \frac{r^3}{2} \sin 2\alpha; \quad (7)$$

$$\varphi = \arccos \frac{\frac{d}{2} - a}{r}, \quad (8)$$

где

$$\alpha = \arccos \frac{\frac{d}{2} - a}{r}.$$

Подставляя эти значения в (7), получим:

$$F(a) = (h - a)c + r^2 \arccos \frac{\frac{d}{2} - a}{r} - \left(\frac{d}{2} - a\right) \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2} - a\right)^2}; \quad (9)$$

$$I(a) = \frac{(h-a)^2 c}{9} + \frac{\left(\frac{2}{3} r \frac{\sin^3 \alpha}{\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha} - r \cos \alpha + (h-a)\right) r^2 \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha\right)}{(h-a)c + r^2 \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha\right)} \quad (10)$$

При выводе формулы (10) использовано значение [2]

$$K_x = \frac{2}{3} r \frac{\sin^3 \alpha}{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha} = 3r \quad (11)$$

через который определяется положение центра тяжести площади сегмента (рис. 2а).

Для вычисления $J(a)$ и $J(\xi)$ воспользуемся теоремой Гюйгенса—Штейнера

$$J_x = J_{cx} + Sd_1^2 \quad (12)$$

и формулой для определения момента инерции площади сегмента (рис. 2а):

$$J_y = \frac{r^4}{2} \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin 4\alpha}{8} \right) = J_{c1} \quad (13)$$

Для прямоугольника с размерами $(h-a)$ и c момент инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести, имеет вид (рис. 2б):

$$J_{c1} = \frac{(h-a)^3 c}{12},$$

и на основании (12):

$$J_x^{(1)} = J_{x_1} + S_1 d_2^2 = \frac{(h-a)^2 c}{12} + (h-a) c \left(l(a) - \frac{h-a}{2} \right)^2 \quad (14)$$

Для площади сегмента:

$$J_x^{(2)} = J_{x_1} + S_2 (d_2^2 - d_1^2), \quad (15)$$

где

$$d_2 = d_1 + \left(h - \frac{d}{2} \right) - l(a); \quad J_{x_1} = J_x^{(2)} + J_x^{(1)} = J(a). \quad (16)$$

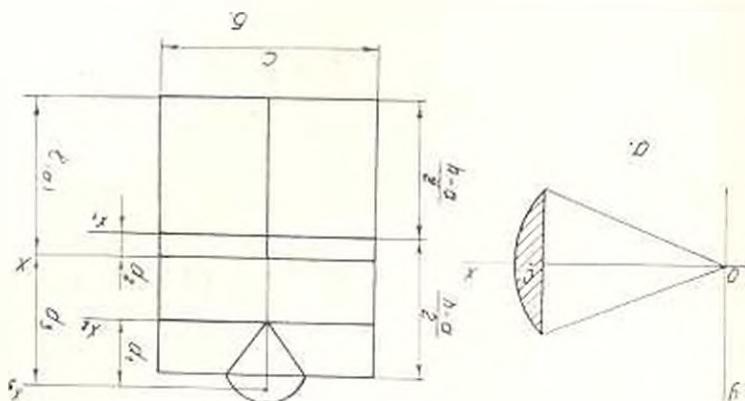


Рис. 2.

На основании (11)–(16) окончательно получим:

$$J(a) = \frac{(h-a)^2 c}{12} + (h-a) c \left(l(a) - \frac{h-a}{2} \right)^2 + \frac{r^2}{4} \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin 4\alpha}{8} \right) + \\ + r^2 \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \left(h - \frac{d}{2} - l(a) \right) \left(\frac{4}{3} r \frac{\sin^3 \alpha}{\alpha - \frac{1}{2} \sin^2 \alpha} + \left(h - \frac{d}{2} \right) - l(a) \right) \quad (17)$$

Подставляя в формулы (6)–(16) вместо a и φ вместо α , получим аналогичные выражения для $J(z)$, $F(z)$, $l(z)$ и $b(z)$.

Для вычисления остаточных напряжений по результатам эксперимента была составлена программа расчета на ЭВМ.

Определены остаточные напряжения волокнистого боралюминиевого композита с матрицей из алюминия марки АД1, с диаметром волокон бора 0,14 мкм и объемной долей $V_f = 0,5$. Приведенный модуль упругости данного композита $E = 2 \cdot 10^5$ Н/мм², предел прочности вдоль направления волокон $\sigma_a = 800 \dots 900$ Н/мм² [3]. Во избежание внесения дополнительных остаточных напряжений образцы вырезаны из листового материала (рис. 1) электронским методом в виде стержней прямоугольного сечения следующих размеров: $l = 95$ мм; $b = 8$ мм; $h = 2,57$ мм.

Для измерения использовались проволоочные тензодатчики 2ПКБ-20-200 ГБ с сопротивлением $R = 200 \text{ Ом}$, с базой 5 мм для точечного измерения, по 2 шт. на каждый образец. Снятие слоев матрицы образца осуществлялось с помощью обычного травления, при этом применялся щелочной раствор, содержание которого подбиралось предварительными опытами из условия равномерного снятия металла, необходимой скорости травления и недопущения точечного разрушения поверхности образца, где наклеены тензодатчики.

Показания тензодатчиков записывались на осциллографе типа П-105 с одновременной фиксацией данных на вольтметре через усилитель типа УТ-4М; предварительно осуществлялась соответствующая тарировка.

Запись показаний производилась по схеме полумоста для увеличения точности измерений, при этом пассивные тензодатчики, склеенные на пластинке из композита, тоже погружались в раствор для исключения влияния температуры раствора на показания измерений.

Расчетанные значения остаточных напряжений приведены на рис. 3.

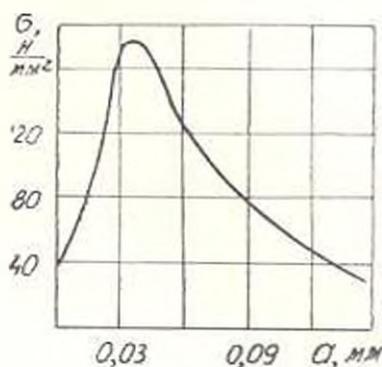


Рис. 3.

ЕрНИ им. К. Маркса

Ա. Չ. ՊԱՊԱՐԱԿԱՆ, Վ. Վ. ՈՒՔԱՅԵՆՅԱՆ, Գ. Վ. ՇՈՎՆԱՐՅԱՆՅԱՆ, Թ. Ա. ԱՐԵՏՅԵՎ

ԵՆԿՅՈՐՁԱԿԱՆ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԹԵՐԿԱՎՈՐ ԲՈՐԱՋԱՌՄԵՆՆԵՐԻ ԿՈՄՊՈԶԻՏՆԵՐՈՒՄ

Ա. Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Դիտարկվում է մնացորդային լարումների բաշխման և մեծության բաժակային գնահատումը, որոնք առաջանում են մետաղական թելիկավոր կոմպոզիտների մատրիցայի և թելիկի բաժանման մակերևույթների վրա նրանց պատրաստման ընթացքում:

Կատարված են մնացորդային լարումների որոշման էաշարկային կախվածություններ, կոմպոզիտի մատրիցայի կիրազծման ընթացքում առաջացած դեֆորմացիաների շարժան միջոցով նմուշի ձողի ներքին նիստին տեսեված ավիշների օդնուկյամբ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бирлер Н. А. Остаточные напряжения — М. Машино, 1963 — 232 с.
2. Яблонский А. А., Пикифоров В. М. Курс теоретической механики — Учебн для вузов, 5-е изд. — М. Высшая школа, 1977, ч. 1. — 366 с.
3. Сендецки Дж. Уругие свойства композитов — В кн.: Композиционные материалы. М.: Мир, т. 2, с. 61—95.