

УДК 624.016  
 624.04(02)

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-  
 ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ВКМ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ  
 МАТРИЦЕЙ

ИШАНЯН Ю. С.

Возрастающие требования к точности и достоверности оценки поведения конструкций из ВКМ ставят задачу более адекватного описания напряженно-деформационного состояния материала при различных типах нагружения. Упруго-линейная модель монофазного композиционного материала как одна из возможно простых подходов, позволяет относительно просто предсказать поведение элементов конструкции на основе начальных свойств в условиях повторяющихся нагрузок. Однако при этом возникает необходимость довольно жестких ограничений на рабочую область напряжений, поскольку в этом случае, как правило, приходится принимать предположение, что слой разрушился, если внешняя нагрузка создает в нем напряжения, выходящие за рамки линейных областей [1]. Естественно, что в этом случае происходит не полное использование возможностей материала, если оно, как это имеет место для ВКМ и особенно при металлической матрице (ММ), проявляет существенную нелинейность [2, 3]. При этом «неупругость» [4] материала проявляется также в том, что напряжения и деформации не являются однозначными функциями друг от друга в области малых напряжений, при которых еще не возникают заметных остаточных деформаций, что приводит к образованию замкнутой петли гистерезиса.

Неупругость ВКМ с ММ в отличие от случая эпоксидной матрицы определяется в первую очередь развитием микропластичности в матрице, связанной с наличием микронеоднородности, сложного поля остаточных технологических термо и механических напряжений и др., что характеризует неоднородность процесса накопления пластических деформирующихся объемов в материале под нагрузкой [5]. При этом дополнительным фактором для ВКМ является наличие упрочняющих волокон, стесняющих развитие сплошных пластических зон, выходящих на поверхность материала.

Многочисленные экспериментальные исследования показали преимущества и перспективность использования в металлокомпозитах высокомодульных и высокопрочных борных и углеродных волокон [1, 2]. Можно считать установленным факт упругого поведения по-

добрных волокон (в рамках точности принимаемых для проводимых исследований в целом) вплоть до разрушения [1, 6, 7].

### 1. Модель описания напряженно-деформационных зависимостей металлической матрицы с учетом эффекта микропластического поведения

Принимая исходное предположение о постоянстве скорости вхождения материала матрицы в микропластическое состояние [5, 8]

$$\frac{dV_{sp}}{dt_i} = c_i \quad (1.1)$$

где  $c_i$  — структурно-чувствительный параметр;  $\varepsilon_i$  — интенсивность деформаций, нетрудно получить характеристики описания поведения материала.

#### Активное (пионерное) нагружение

Учитывая известные соотношения, связывающие интенсивности напряжений и деформаций упругого тела, для приращений  $d\sigma_i$  и  $d\varepsilon_i$  микропластической матрицы имеем

$$d\sigma_i = 3\bar{G}d\varepsilon_i \quad (1.2)$$

где, учитывая (1.1), для  $\bar{G}$  получим

$$\bar{G} = G_0(1 - c_i\varepsilon_i) = \bar{k}_G G_0 \quad (1.3)$$

и, следовательно,

$$\sigma_i = 3\bar{G}\varepsilon_i, \quad \bar{G} = \left(1 - \frac{1}{2} c_i\varepsilon_i\right) G_0 = \bar{k}_G G_0 \quad (1.4)$$

Отметим, что представление (1.4) можно трактовать как формальное выражение гипотезы упрощения теории пластичности Шлюшера [9]. Дополняя это соотношение известными формулами, отражающими гипотезу упругости объемной деформации и пропорциональности девиаторов, получим

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \bar{B}(\varepsilon_x + \bar{\nu}\varepsilon_y), & \bar{B} &= E/(1-\bar{\nu}^2) = \bar{G} + E_0/2(1-\nu_0) \\ \sigma_y &= \bar{B}(\varepsilon_y + \bar{\nu}\varepsilon_x), & \bar{E} &= \bar{k}_E E_0 \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\varepsilon_{xy} = \bar{G}\gamma_{xy}, \quad \bar{\nu} = \bar{k}_\nu \nu_0$$

где

$$\bar{k}_G = \bar{k}_E(1 + \nu_0)/(2 - \bar{k}_E(1 - \nu_0))$$

$$\bar{\nu} = (E_0 - 2\bar{G}(1 - \nu_0))/(E_0 + 2\bar{G}(1 - \nu_0)) = (1 - \bar{k}_E + (1 + \bar{k}_E)\nu_0)/(1 + \bar{k}_E + (1 - \bar{k}_E)\nu_0) \quad (1.6)$$

$$\bar{k}_E = \bar{k}_E(1 + \nu_0)/(1 - \nu_0); \quad \sigma_x = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 3\sigma_y\sigma_x + 3\tau_{xy}^2}$$

$$\varepsilon_x = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_z^2 + 3\varepsilon_{xy}^2} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{3}{4} \varepsilon_{xy}^2}$$

в последнем соотношении пренебрежено поперечным (нормальным) обжатием ( $\varepsilon_z = 0$ ).

В случае одноосного нагружения  $\varepsilon_y = 0$ ;  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$  имеем

$$\varepsilon_x = E_0 \left(1 - \frac{c}{2} \varepsilon_0\right) \varepsilon_1, \quad \varepsilon_1 = (1 - \nu_0) \varepsilon_0, \quad c = \frac{2}{3} c_1 (1 + \nu_0) \quad (1.7)$$

Плоскостность деформации зависит, как и прежде

$$\mu = 2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2}{3} (1 - c) \varepsilon_0}\right) c_1 (1 - \nu_0) \quad (1.8)$$

а для деформации  $\varepsilon_1$  получим

$$\varepsilon_1 = \frac{3}{2} \varepsilon_0 (1 - c_1 (1 - \nu_0) \mu) (1 + \nu_0) \quad (1.9)$$

Для малых значений  $\varepsilon_0$  (с точностью до  $(c_1 \mu)^2$ ) можно записать

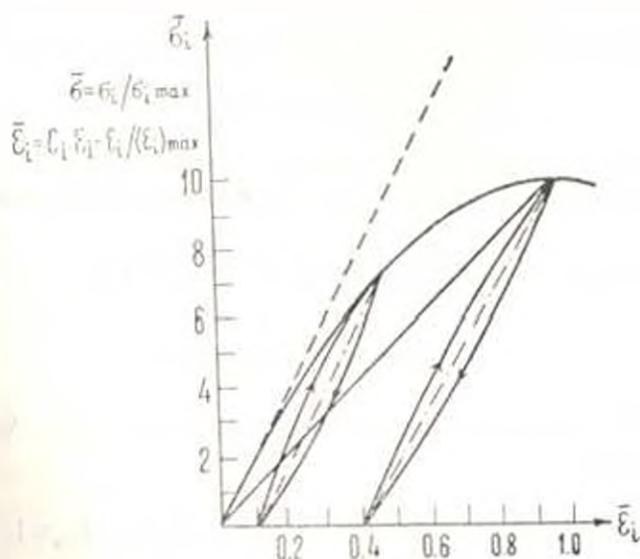
$$\varepsilon_x = E_0 (1 - c_1 \mu) \varepsilon_0, \quad c = (1 + \nu_0)^2 c_1 \mu \quad (1.10)$$

Соотношения (1.7)–(1.10) позволяют оценить значения изотропного модуля  $E_0$  и структурно-чувствительного параметра  $c_1$  на основе опытов на одноосное растяжение:

$$c_1 = 3k(1 - \sqrt{1 - \nu_0 \varepsilon_0}) / 2(1 + \nu_0) \varepsilon_1$$

$$E_0 = 4k \mu (1 - \nu_0) c_1 / 3, \quad G_0 = \frac{\mu}{3} \nu_0 c_1 \quad (1.11)$$

Используя зависимости (1.11) для известных матриц, можно получить оценочные значения введенных параметров [10, 11].



Фиг. 1. Деформация  $(\sigma_i - \sigma_{i, \max})$

Аналогичные выражения также получаются для приращений напряженно-деформационного состояния, в которых будут фигурировать уже величины с индексами (≈) вместо (—). Так, например, при одностороннем растяжении

$$d\varepsilon_r = E_0 \bar{k}_r d\varepsilon_s, \quad \bar{k}_r = 2\bar{k}_0(1 + \nu_0 + \bar{k}_0(1 - \nu_0)) \quad (1.12)$$

В общем случае можно записать соотношение Гука в виде

$$[d\varepsilon] = [\bar{B}][d\varepsilon], \quad [\bar{B}] = \bar{B} \begin{bmatrix} 1, & \bar{\nu}, & 0 \\ \bar{\nu}, & 1, & 0 \\ 0, & 0, & (1 - \bar{\nu})/2 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

## 2. Разгрузка с достигнутого уровня напряженно-деформационного состояния ( $\varepsilon_i^*$ , $\varepsilon_i$ )

Аналогично предыдущему пункту получаем

$$d(\varepsilon_i^* - \varepsilon_i) = 3\bar{G}_p d(\varepsilon_i^* - \varepsilon_i), \quad \bar{G}_p = G_0(1 - c_i(\varepsilon_i^* - \varepsilon_i)/2) \approx G_0 \bar{k}_c^{(p)} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_i^* - \varepsilon_i = 3\bar{k}_c^{(p)} G_0(\varepsilon_i^* - \varepsilon_i), \quad \bar{k}_c^{(p)} = 1 - c_i(\varepsilon_i^* - \varepsilon_i), \quad \varepsilon_i^* = (1 - \sqrt{1 - 2\varepsilon_i^* c_i / 3G_0}) / c_i$$

В случае одностороннего нагружения учитывая (1.7), получим

$$(\varepsilon_i^*)^* = (1 - \sqrt{1 - 2\varepsilon_i^* c_i' / E_0}) / c_i' \quad (2.2)$$

В общем случае соотношение Гука можно записать в виде

$$[d(\varepsilon^* - \varepsilon)] = [\bar{B}_p][d(\varepsilon^* - \varepsilon)], \quad [\varepsilon^* - \varepsilon] = [\bar{B}_p][\varepsilon^* - \varepsilon] \quad (2.3)$$

$$\bar{B}_p = \bar{G}_p + E_0 / 2(1 - \nu_0) - B_0((1 + \nu_0) / 2 + \bar{k}_{0p}(1 - \nu_0) / 2)$$

$$B_0 = E_0 / (1 - \nu_0^2)$$

Аналогичные зависимости получим для матрицы  $[\bar{B}_p]$ . Из соотношений (2.1) несложно получить для интенсивности остаточных деформаций

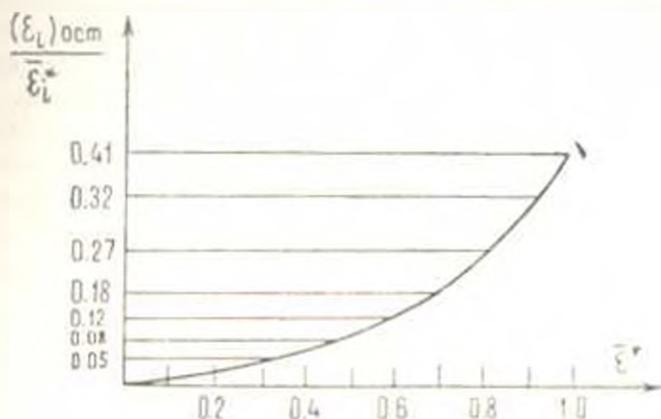
$$(\varepsilon_i)_{ост} = \varepsilon_i^* - \varepsilon_i^* / 3\bar{G}_p = \varepsilon_i^* - (1 - \sqrt{1 - \varepsilon_i^* c_i / 3G_0}) / c_i \quad (2.4)$$

## 3. Повторное нагружение

В случае повторного нагружения, используя модель Мазинга [11, 12, 13], имеем

$$d\varepsilon_i = 3\bar{G}_n d\varepsilon_s, \quad \bar{G}_n = \bar{k}_{0n} G_0, \quad \bar{k}_{0n} = 1 - \frac{c_i}{2} \varepsilon_i, \quad \bar{k}_{0n} = 1 - c_i \varepsilon_i / 4$$

соответственно в зависимости  $\Gamma$  или  $\delta$  для полторного нагружения необходимо коэффициенты, определяющие значения  $k_1$  и  $k_2$ .



Фиг. 2

На фиг 1—2 приведены типичные диаграммы зависимости  $\sigma_1 - \epsilon_1$  и  $(\epsilon_L)_{ост}$  — интенсивности остаточных деформаций. Расчеты проведены для матрицы типа ADI и борного волокна.

#### 4. Основные соотношения для монослоя

На уровне монослоя неоднородный композиционный материал волокнистой структуры моделируется в виде однородного анизотропного тела, макроскопические характеристики которого определяются через соответствующие характеристики составляющих элементов на основе методологии структурной механики композитов или теории армирования. Предложено значительное число методов получения упрощенных характеристик [14—24], охватывающих широкий сектор подходов от способов сопротивления материалов до стохастических моделей с использованием точных решений задач, поставленных на уровне теории упругости и конечно-элементного анализа.

Отдельную группу составляют модели, позволяющие охарактеризовать процесс накопления повреждений вплоть до разрушения, то есть кинетику процесса [25].

Простейшие модели, используемые для оценки поведения монослоя, могут вести при этом двойную нагрузку. Во первых, позволяют наиболее экономно оценить поведение монослоя при сложных напряженно-деформационных нагружениях, что особенно важно в задачах оптимизационного плана, а во вторых, позволяют в большей последовательного уточнения для более точных методов. Следует отметить также, что поскольку количество случайных факторов велико (геометрические параметры структуры композита, свойства армирующих во-

локон, форма и характерные размеры сечений, искривленность волокон в ходе технологических процессов, сложные физико-химические процессы и неполная связь на границе раздела и т. д.), «уточненные» модели не всегда приводит к более удовлетворительному соответствию с экспериментом. То есть может иметь место «перекрытие» разброса экспериментальных данных результатов «уточнения» [26].

Исследуемая модель поведения монослоя ВКМ с ММ, которую можно отнести к классу структурно-кинетических, занимает промежуточное положение между моделями оценки упруго-вязкоупругих характеристик и кинетических моделей разрушения и объединяет возможность описания нелинейного поведения материала в процессе нагружения и разгрузки с достаточно простыми формами записи этих зависимостей и оценки несущей способности монослоя.

Примем общепринятые предположения для монослоя ВКМ, отражающие условия равновесия и совместности деформаций [10, 16—20].

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{1a} = \varepsilon_{1m}, \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_{2a} = \varepsilon_{2m}, \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_{12a} = \varepsilon_{12m} \quad (4.1)$$

Примем, что деградация модулей композита определяется, в основном, октаэдрическими угловыми деформациями матрицы. Рассмотрим случай пассивного (активного) нагружения, разгрузки и повторного нагружения. Основываясь на предположениях (4.1), приведем зависимости для технических характеристик монослоя композита.

## 5. Активное нагружение

Соотношения для продольных характеристик будут:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{11} &= \tilde{E}_{11} d\varepsilon_{11} & \varepsilon_{11} &= \tilde{E}_{11} \varepsilon_{11} \\ \tilde{E}_{11} &= E_{11}^0 \bar{k}_{11} & \tilde{E}_{11} &= E_{11}^0 \bar{k}_{11} \\ E_{11}^0 &= \xi E_a^0 + (1 - \xi) E_m^0 \quad (\xi - \text{объемная доля волокна}) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Для коэффициентов деградации касательного и секущего модулей имеем

$$\begin{aligned} \bar{k}_{11} &= 1 - (1 - \xi) E_m^0 (1 - \bar{k}_{E,m}) / E_{11}^0 \\ \bar{k}_{12} &= 1 - (1 - \xi) E_m^0 (1 - \bar{k}_{E,m}) E_{12}^0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Здесь величины  $\bar{k}_{E,m}$  и  $\bar{k}_{I,m}$  имеют вид

$$\bar{k}_{E,m} = 2k_{G,m} / (1 + \nu_m^0 + (1 - \nu_m^0) k_{G,m}) \quad (5.3)$$

Здесь

$$\bar{k}_{I,m} = 1 - c_I \varepsilon_{I,m}, \quad \bar{k}_{G,m} = 1 - c_G \varepsilon_{I,m} / 2 \quad (5.4)$$

соответственно коэффициенты деградации касательного и секущего модулей сдвига матрицы

$$G_m = G_m^0 k_{G,m} \quad (5.5)$$

В приведенных соотношениях и далее индекс (0) означает начальное значение величины. Отметим, что в приведенных зависимостях величина интенсивности деформаций матрицы  $\varepsilon_{im}$  должна быть занесена в параметры напряженно-деформационного состояния композита. Для плоской деформационной модели

$$\varepsilon_{im} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + \varepsilon_{11}\varepsilon_{22} + 3(\varepsilon_{12})^2}/4 \quad (5.6)$$

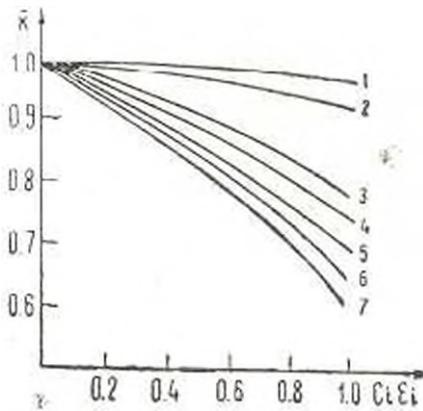
в случае плоского напряженного состояния

$$\begin{aligned} \varepsilon_{im} &= \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + \varepsilon_{11}\varepsilon_{22} + 3(\varepsilon_{12})^2}/4 \\ \varepsilon_{22} &= -\nu_m \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}^0 (G_m + G_m^0(1 + \nu_m^0)/(1 - \nu_m^0)), \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_{12}^0 G_m \\ \bar{\nu}_m &= (1 - \bar{k}_{G,m} - \nu_m^0(1 + \bar{k}_{G,m}))(1 + \bar{k}_{G,m} + \nu_m^0(1 - \bar{k}_{G,m})) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Например, для матрицы AD1 при  $\xi = 0,5$  и  $\nu_0 = 0,2$  имеем  $(\bar{k}_{11})_{min} = 0,94$ . Аналогично (3.1) для поперечных характеристик имеем

$$\begin{aligned} \bar{E}_{22} &= \bar{k}_{22} E_{22}^0, \quad \bar{E}_{22} = \bar{k}_{22} E_{22}^0, \quad E_{22}^0 = (\xi E_s + (1 - \xi) E_m^0)^{-1} \\ k_{22}^{-1} &= 1 + \frac{E_{22}^0}{E_s} (1 - \xi)(1 - k_{E,m}) E_m^0 k_{E,m} \end{aligned} \quad (5.8)$$

для матрицы AD1 имеем  $(\bar{k}_{22})_{min} \approx 0,66$  при  $\xi = 0,5$  ( $\bar{k}_{22})_{max} = 0,63$  при  $\xi = 0$ .



- Фиг. 3
- |                           |  |
|---------------------------|--|
| 1. $k_{11} - (\xi = 0,8)$ | 5. $k_{11} - (\xi = 0)$ и $k_{22} - (\xi = 0)$ |
| 2. $k_{11} - (\xi = 0,5)$ | 6. $k_{22} - (\xi = 0,5)$                      |
| 3. $k_{22} - (\xi = 0,8)$ | 7. $k_{22} - (\xi = 0)$                        |
| 4. $k_{G} - (\xi = 0,8)$  |  |

Фиг. 3

Для внутрислойных сдвиговых характеристик получаем

$$\bar{G}_{12} = \bar{k}_{22} G_{12}^0, \quad \bar{G}_{11} = \bar{k}_{12} G_{12}^0, \quad G_{12}^0 = (\xi G_a + (1 - \xi) G_m^0)^{-1} \quad (5.9)$$

$$\bar{k}_{12}^{-1} = 1 + G_{12}^0 (1 - \xi) (1 - k_{0m}) G_m^0 k_{0m}, \quad G_{12}^0 = (\xi G_a + (1 - \xi) G_m^0)^{-1}$$

На фиг. 3 представлена картина зависимости деградации продольного, поперечного и сдвигового секущего модуля в зависимости от накопленной матрицей интенсивности деформаций и объемной доли волокна.

## 6. Разгрузка с достигнутого уровня ( $\varepsilon^*$ , $\varepsilon^*$ ) и повторное нагружение

Аналогично пункту 5 имеем

$$\bar{E}_{11} = E_{11}^0 \bar{k}_{11}^{(p)}, \quad \bar{E}_{12} = E_{12}^0 \bar{k}_{12}^{(p)} \quad (6.1)$$

$$d\varepsilon_{ij} = \bar{E}_{ij}^{(p)} d\varepsilon_{ij}, \quad \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^* = \bar{E}_{ij}^{(p)} (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^*) \quad (j = 1, 2)$$

где

$$\bar{k}_{11}^{(p)} = 1 - (1 - \xi) E_m^0 (1 - \bar{k}_{E_m}^{(p)}) / E_{11}^0, \quad \bar{k}_{12}^{(p)} = 1 - (1 - \xi) E_m^0 (1 - \bar{k}_{E_m}^{(p)}) / E_{12}^0 \quad (6.2)$$

Величины  $\bar{k}_{E_m}^{(p)}$ ,  $\bar{k}_{G_m}^{(p)}$  — коэффициенты деградации касательных и секущих модулей матрицы при разгрузке определяются зависимостями (1.6) и (1.12), где надо положить для коэффициентов деградаций сдвиговых модулей матрицы при разгрузке.

$$\bar{k}_{E_m}^{(p)} = 1 - c_1 (\varepsilon_{im}^* - \varepsilon_{im}) / 2, \quad \bar{k}_{G_m}^{(p)} = 1 - c_1 (\varepsilon_{im}^* - \varepsilon_{im}) / 4 \quad (6.3)$$

Для коэффициентов деградаций поперечных и сдвиговых модулей пологонестого компонента при разгрузке получим

$$(k_{22}^{(p)})^{-1} = 1 + E_{22}^0 (1 - \xi) (1 - k_{E_m}^{(p)}) E_m^0 k_{E_m}^{(p)} \quad (6.4)$$

и

$$(k_{12}^{(p)})^{-1} = 1 + G_{12}^0 (1 - \xi) (1 - k_{E_m}^{(p)}) G_m^0 k_{G_m}^{(p)} \quad (6.5)$$

Остаточные деформации при разгрузке определяются из соотношений

$$(\varepsilon_{ij})_{\text{ост}} = \varepsilon_{ij}^* - \varepsilon_{ij}^* \bar{E}_{ij}^{(p)} \quad (6.6)$$

Точно так же можно получить напряженно-деформационные зависимости при повторном нагружении. Здесь, например, можно написать

$$d\varepsilon_{ij}^{(n)} = E_{ij}^0 \bar{k}_{ij}^{(n)} d\varepsilon_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} = E_{ij}^0 \bar{k}_{ij}^{(n)} \varepsilon_{ij} \quad (6.7)$$

$$d\varepsilon_{12}^{(n)} = G_{12}^0 \bar{k}_{12}^{(n)} d\varepsilon_{12}, \quad \varepsilon_{12} = G_{12}^0 \bar{k}_{12}^{(n)} \varepsilon_{12}$$

где в определяющих соотношениях для коэффициентов деградации необходимо положить для матрицы при повторном нагружении

$$\bar{k}_{E_m}^{(n)} = 1 - c_1 \varepsilon_{im} / 2, \quad \bar{k}_{G_m}^{(n)} = 1 - c_1 \varepsilon_{im} / 4 \quad (6.8)$$

Таким образом, получаем замкнутую систему для определения напряженно-деформационных зависимостей композита с учетом деградаций модулей в результате накопления пластических деформаций в матрице.

## 7. Расчет напряженно-деформационного состояния перекрестно-армированных монопакетов

Для конкретных расчетов с помощью полученных соотношений может быть предложен следующий алгоритм последовательных приближений:

I. Определение начальных значений.

1.1.  $n=1$

2.  $|T|=|T|_0$  — заданные усилия

3.  $\varepsilon_{im}=0$  — начальная интенсивность деформаций нулевая

4.  $E_{11}=E_{11}^0$ ,  $E_{22}=E_{22}^0$ ,  $G_{12}=G_{12}^0$ ,  $\nu_{12}=\nu_{12}^0$

5.  $|B_0|=|B_0|_0$

6.  $|C|=|C|_0$  — (мембранная жесткость)

7.  $\varphi=\varphi_0$

II. Вычисление характеристик напряженно-деформационного состояния.

2.1.  $n=n+1$

2.  $|\varepsilon|=|C|^{-1}|T|$

3.  $|\varphi_0|=|\varphi_0|(|\varepsilon|)$  ( $|\varphi_0|$  — матрица преобразований деформаций при повороте на угол  $\varphi$ )

4.  $|\tau_0|=|B_0|^{-1}|\varepsilon_0|$

5.  $\varepsilon_{im}$

6.  $k_{0m}$ ,  $k_{xm}$ ,  $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_{12}$

7.  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $G_{12}$ ,  $\nu_{12}$

8.  $\varphi=\varphi + \varepsilon_{12}^0/2$

9.  $|B_0|$ ,  $|C|$

III. Условия остановки

3.1. Если  $|\varepsilon_{im}(n+1) - \varepsilon_{im}(n)| / |\varepsilon_{im}(n)| < \varepsilon$ , или  $n > \bar{n}$

где  $\varepsilon$  — точность расчетов,  $\bar{n}$  — допустимый предел циклов — счет завершен.

3.2. Иначе идти к 2.1

Отметим, что предложенная модель справедлива при

$$\varepsilon_{im}^* \leq \varepsilon_{im} \leq l/c_i$$

# BASIC STRESS-STRAIN RELATION CONDITION VKM WITH METAL MATRIX COMPOSITES

Ju. S. NSHANIAN

## ԲԵՏԱՎՅԱԼ ԲԱՏՐԻՑԱՅԻՆ ԿՈՄՊՈԶԻՑԻՈՆ ՆՏՈՒԹՅՈՒՆ ԸԱՐՎԱՆԱՅԻՆ ԿՆՏՐՈՒԱՅԻՆ ԿԼՈՒ ԶԻՄՆԱԿԱՆ ԱՌՆՉՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

ՅՈՒ. Ս. ՆՇԱՆԻԱՆ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Այս առարկայում քննարկվում է մետաղյա մատրիցայով կոմպոզիցիոն կոմպոզիցիոն համար ընդհանրացված ու գծային Հուգի ստեռոգրաֆիայի ստացման խնդիրը:

Ունիվերսալում է, որ ու գծայինությունը, որոշված է միկրոստրուկտուրային հանգույցների ստեղծման և զարգացման հետ, ընդ որում նրանց փոփոխման արագությունը հաստատուն է:

Ակտիվ բեռնախափման և կրկին (կրկնակի) բեռնափորման համար կա սուղվում են հաշվարկի արդյունավետ սպարիթմներ:

### ЛИТЕРАТУРА

1. Композиционные материалы. Т. 5. Разрушение и усталость. Под ред. Л. Браугмана.—М.: Мир, 1978. 483 с.
2. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей. Под ред. М. Х. Шоршорова.—М.: Машиностроение, 1981
3. Друккер Д. Пластичность, течение и разрушение—В кн.: Неупругие свойства композиционных материалов—М.: Мир, 1978, с. 9—32
4. Zener C. Elasticity and anelasticity of metals.—Chicago: 1948. 178 p.
5. Гурьев А. В., Цепляева Т. Н., Шоршоров М. X. Оценка сопротивления деформированному композиционному материалу с ориентированными высокопрочными волокнами.—В кн.: Металлопластика и прочность металлов: Сб. науч. тр. /ВПИ—Волгоград: 1982, с. 3—13.
6. Miletko S. T. Fracture mechanics of composites—Compos. Mater. Repts. 1-41 Soviet—Jap. Symp.—Moscow, 1979, p. 274—285.
7. Кошнев И. М., Овчинский А. С. Разрушение металлов армированных волокнами—М.: Наука, 1977. с. 240.
8. Гурьев А. В. К вопросу о происхождении уругих несовершенств поликристаллического сплава—ФММ, с. 3, вып. 2, 1956, с. 349—359
9. Илькинин А. А. Пластичность—М.: Гостехиздат, 1948, 376 с.
10. Композиционные материалы. т. 4 Композиционные материалы с металлической матрицей. Под ред. К. Крейдера. Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1978. 503 с.
11. Гжиров Р. И. Краткий справочник конструктора—Л.: Машиностроение, 1983, 463 с.
12. Москвитин В. В. Пластичность при переменном нагружении—М.: Из-во МГУ, 1966.
13. Черняк Н. Н., Гаприлов Д. А. Сопротивление деформированию металлов при повтарном статистическом нагружении—Киев: Наукова думка, 1971. 135 с.

14. Болотин В. В. Плоская задача теории упругости для деталей из армированных материалов.—В кн. Расчеты на прочность. М.: Машиностроение, вып. 72, 1966, с. 48—63.
15. Болотин В. В., Новичков Ю. П. Механика многослойных конструкций.—М.: Машиностроение, 1980. 376 с.
16. Ван Ф., Фил Г. А. Теория армированных материалов. Киев: Наукова думка, 1971, 232 с.
17. Сендзичи Дж. Упругие свойства композитов. Композиционные материалы. Под ред. Л. Браутмана, Р. Крэка, Пер с англ. Механика композиционных материалов / Под ред. Дж. Сендзичи, т. 2, М.: Мир, 1978, с. 61—101.
18. Малиейстер А. К., Тамуж В. П., Тетере Г. А. Сопротивление полимерных и композитных материалов.—Рига: Зинатне, 1980. 572 с.
19. Кристинис Р. Введение в механику композитов.—М.: Мир, 1982. 334 с.
20. Скурда А. М., Булане Ф. Я. Структурная теория армированных пластинок. Рига: Зинатне, 1978. 192 с.
21. Рикарде Р. Б., Тетере Г. А., Упитис Э. Т. Модели разрушения композитов с различной структурой армирования.—В кн.: Разрушение композитных материалов. Рига: Зинатне, 1979, с. 126—131.
22. Кравчук А. С., Майборода В. П., Уржумцев Ю. С. Механика полимерных и композиционных материалов. Экспериментальные и численные методы.—М.: Наука, 1985. 304 с.
23. Победря Б. Е. Механика композиционных материалов.—М.: МГУ, 336 с.
24. Бахвалов Н. С., Панасенко Г. П. Осреднение процессов в периодических средах.—М.: Наука, 1984. 352 с.
25. Овчинский А. С., Гусев Ю. С. Моделирование на ЭВМ процессов образования, роста и слияния микродефектов в структурно-неоднородных материалах.—Мех. композ. матер., 1982, № 4, с. 585—592.
26. Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Б. Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов.—М.: Машиностроение, 1984. 261 с.

Республиканский главный вычислительный  
центр Госагропрома Армянской ССР

Поступила в редакцию  
31 V.1988