

ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ЗЕРНИСТО-ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ МИКРОПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТРИЦЫ

Модель кратковременной микроповреждаемости обобщается на случай трехкомпонентного композитного материала, представляющего собой матрицу, стохастически армированную однонаправленными бесконечными волокнами и сфероидальными включениями. Предполагается, что матрица является изотропной, а волокна и сфероидальные включения имеют различные упругие свойства, которые обладают трансверсально-изотропной симметрией. Также полагается, что под воздействием макродеформаций в матрице происходит накопление микроповреждений. Микроповреждения моделируются пустыми порами. Критерий разрушения в микрообъеме принимается в форме Губера – Мизеса, где предел прочности является случайной функцией координат со степенным распределением или распределением Вейбулла. Напряженно-деформированное состояние и эффективные свойства материала с микроповреждениями в компонентах определяются на основе стохастических уравнений упругости для материалов на основе изотропной матрицы и трансверсально-изотропных сфероидов. Замыкание уравнений деформирования и повреждаемости осуществляется на основании уравнения баланса поврежденности (пористости) компонентов. Построены нелинейные зависимости совместных процессов деформирования и повреждаемости матрицы от макродеформаций для трехкомпонентного композита с трансверсально-изотропными включениями.

1. Введение. Статистический подход при исследовании микроповреждаемости композитных материалов основан на моделировании рассеянных единичных микроповреждений квазисферическими микропорами, пустыми или заполненными частицами разрушенного материала [3, 5, 7]. Математические модели, описывающие кратковременную микроповреждаемость, предложены для однородных материалов [2, 7] и композитных материалов с изотропными [5, 9, 10] и анизотропными компонентами [8, 11, 12].

В настоящей работе модель кратковременной микроповреждаемости [2, 7, 8] обобщается на случай трехкомпонентного композитного материала, представляющего собой матрицу, стохастически армированную однонаправленными бесконечными волокнами и сфероидальными включениями с различными упругими свойствами. Предполагается, что волокна и сфероидальные включения обладают трансверсально-изотропной симметрией физико-механических свойств. Также полагается, что под воздействием макродеформаций в матрице происходит накопление микроповреждений.

2. Рассмотрим представительный объем V композитного материала при заданных макродеформациях $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$. Композитный материал представляет собой матрицу, армированную бесконечными волокнами и случайно расположенными сфероидальными включениями, причем предполагается, что волокна и сфероиды имеют различные упругие свойства, которые характеризуются трансверсально-изотропной симметрией. Кроме того, полагаем, что матрица рассматриваемого композита ослаблена стохастически расположенными порами квазисферической формы.

Эффективные упругие свойства и напряженно-деформированное состояние такого композитного материала определяются на основании стохастических уравнений теории упругости, учитывающих случайный характер распределения включений и микропор в матрице, методом условных моментных функций [6]. При однородном нагружении в представительном объеме напряжения и деформации образуют статистически однородные случайные поля, удовлетворяющие условию эргодичности, что позволяет

заменить операцию усреднения по представительному объему на операцию усреднения по ансамблю реализаций. Тогда для макронапряжений и макродеформаций такого материала будет справедлив закон Гука в следующей форме:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \lambda_{ijkl}^{**} \langle \varepsilon_{kl} \rangle, \quad i, j, k, \ell = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Здесь λ_{ijkl}^{**} – тензор эффективных упругих постоянных композитного материала, σ_{ij} , ε_{kl} – тензоры напряжений и деформаций, а угловые скобки обозначают усреднение по ансамблю реализаций. Тензор эффективных упругих постоянных такого композита определяется в несколько этапов. На первом этапе на основании соотношений для пористых материалов [13] определяем эффективные упругие модули матрицы, ослабленной порами. Затем на основании результатов, полученных для материалов, упрочненных однонаправленными сфероидными с трансверсально-изотропной симметрией физико-механических свойств [4], последовательно в два этапа определяем эффективные свойства всего композита с двумя различными типами включений.

Предположим, что матрица имеет начальную пористость p_{02} и концентрация включений в матрице равна c_{11} и c_{12} для волокон и сфероидальных включений соответственно. Тогда компоненты тензора эффективных упругих модулей всего композита можно определить как функцию упругих модулей компонентов $\lambda_{ij\alpha\beta}^{[1,1]}$, $\lambda_{ij\alpha\beta}^{[1,2]}$ и $\lambda_{ij\alpha\beta}^{[2]}$ (индексы [1,1] и [1,2] обозначают включения первого (волокна) и второго типа (сфероиды) соответственно, а [2] обозначают пористую матрицу), объемного содержания включений c_{11} , c_{12} в матрице и параметра, характеризующего форму сфероидальных включений t [4]:

$$\lambda_{ijkl}^{**} = \lambda_{ijkl}^{**}(\lambda_{mnpq}^{[1,1]}, \lambda_{mnpq}^{[1,2]}, \lambda_{mnpq}^{[2]}, c_{11}, c_{12}, t), \quad m, n, p, r = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где

$$t = \frac{t_3}{t_1}. \quad (3)$$

Здесь t_1 , t_3 – полуоси сфероида в направлении осей симметрии.

Тензор $\lambda_{ijkl}^{[2]}$ определяется на основании соотношений, полученных в [13] через тензор упругих модулей скелета матрицы λ_{ijkl}^2 и ее пористость p_2 , которая характеризует повреждаемость:

$$\lambda_{ijkl}^{[2]} = \lambda_{ijkl}^{[2]}(\lambda_{mnpq}^2, p_2). \quad (4)$$

Зная макродеформации и определив тензор эффективных упругих модулей всего композита, можно вычислить средние деформации матрицы $\langle \varepsilon_{pq} |_2 \rangle$ [4]:

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon_{pq} |_2 \rangle = & (I_{pqkl} + (1 - c_{12})(c_{12}\lambda_{pqkl}^{[1,2]} + (1 - c_{12})\lambda_{pqkl}^* - \\ & - \lambda_{pqkl}^{**})(\lambda_{klrs}^{[1,2]} - \lambda_{klrs}^*)^{-1})(I_{rsmn} + c_2'(\langle \lambda_{rsmn} \rangle + \\ & + \lambda_{rsmn}^*)(\lambda_{mni j}^{[3]})^{-1}) \langle \varepsilon_{ij} \rangle, \quad p, q, r, s = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь λ_{pqkl}^* – тензор эффективных упругих постоянных композита на основе пористой матрицы и бесконечных волокон, который можно определить

на основании соотношений, представленных в [4], а также

$$\langle \lambda_{rsmn} \rangle = c'_1 \lambda_{rsmn}^{[1,1]} + c'_2 \lambda_{rsmn}^{[2]}, \quad \lambda_{mnij}^{[3]} = \lambda_{mnij}^{[1,1]} - \lambda_{mnij}^{[2]}, \quad (6)$$

где c_2 – объемное содержание матрицы, а c'_1 и c'_2 определяются следующими соотношениями:

$$c'_1 = \frac{c_{11}}{c_{11} + c_2}, \quad c'_2 = \frac{c_2}{c_{11} + c_2}, \quad c_{11} + c_{12} + c_2 = 1. \quad (7)$$

В свою очередь, зная средние деформации матрицы $\langle \varepsilon_{k\ell} |_2 \rangle$, можно определить средние матричные напряжения $\langle \sigma_{ij} |_2 \rangle$, которые связаны между собой следующим образом:

$$\langle \sigma_{ij} |_2 \rangle = \lambda_{ijk\ell}^{[2]} \langle \varepsilon_{k\ell} |_2 \rangle. \quad (8)$$

В то же время, средние по скелету матрицы напряжения $\langle \sigma_{ij}^2 \rangle$ связаны со средними матричными напряжениями $\langle \sigma_{ij} |_2 \rangle$ зависимостью

$$\langle \sigma_{ij}^2 \rangle = \frac{1}{1 - p_{02}} \langle \sigma_{ij} |_2 \rangle. \quad (9)$$

Таким образом, на основании выражений (5)–(9), средние напряжения по скелету матрицы $\langle \sigma_{ij}^2 \rangle$ связаны с макродеформациями посредством соотношений

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{ij}^2 \rangle = & \frac{1}{1 - p_{02}} \lambda_{ijpq}^{[2]} (I_{pqk\ell} + (1 - c_{12})(c_{12} \lambda_{pqk\ell}^{[1,2]} + \\ & + (1 - c_{12}) \lambda_{pqk\ell}^* - \lambda_{pqk\ell}^{**}) (\lambda_{k\ell rs}^{[1,2]} - \lambda_{k\ell rs}^*)^{-1} * \\ & * (I_{rsmn} + c'_2 (\langle \lambda_{rsmn} \rangle + \lambda_{rsmn}^*) \lambda_{mna\beta}^{[3]})^{-1} \langle \varepsilon_{a\beta} \rangle. \end{aligned} \quad (10)$$

Предположим, что критерий разрушения скелета матрицы определяется предельным значением интенсивности средних по неразрушенной части касательных напряжений [1]:

$$I_\sigma^2 = \left(\langle \sigma_{ij}^2 \rangle', \langle \sigma_{ij}^2 \rangle' \right) = k_2, \quad (11)$$

где $\langle \sigma_{ij}^2 \rangle'$ – девиатор средних по скелету матрицы напряжений, а k_2 – соответствующее предельное значение прочности матрицы, являющееся случайной функцией координат.

Одноточечная функция распределения $F(k_2)$ случайной величины k_2 представляет собой асимметричную кривую. Наиболее подходящая аппроксимация экспериментально наблюдаемой кривой может быть описана степенным законом на конечном интервале [3, 7]:

$$F(k_2) = \begin{cases} 0, & k_2 < k_0, \\ \left(\frac{k_2 - k_0}{k_1 - k_0} \right)^\alpha, & k_0 \leq k_2 \leq k_1, \\ 1, & k_2 \geq k_1, \end{cases}$$

или распределением Вейбулла на полубесконечном интервале [3, 5, 7]:

$$F(k_2) = \begin{cases} 0, & k_2 < k_0, \\ 1 - \exp(-n(k_2 - k_0)^\alpha), & k_2 \geq k_0. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь k_0 – минимальная величина предельного значения интенсивности средних по скелету матрицы касательных напряжений k_2 , с которого начинается разрушение материала матрицы, k_1 , n и α – коэффициенты, выбираемые из условия наилучшей аппроксимации разброса прочности, которые для каждого материала определяются экспериментально.

Пусть до начала деформирования композита начальная микроповрежденность матрицы характеризуется пористостью p_{02} . Также предположим, что случайное поле предела микропрочности k_2 является статистически однородным, что характерно для реальных материалов, а размеры единичных микроразрушений и расстояний между ними пренебрежимо малы по сравнению с размерами рассматриваемого макрообъема материала. Тогда имеет место свойство эргодичности, согласно которому функция распределения $F(k_2)$ определяет относительное содержание неразрушенной части материала матрицы, где предел микропрочности меньше соответствующего значения k_2 . Поэтому, если известны напряжения в скелете матрицы $\langle \sigma_{ij}^2 \rangle$, то функция $F(I_\sigma^2)$ определяет в соответствии с (11), (12) относительное содержание разрушенных микрообъемов в матрице. Если разрушенные микрообъемы моделировать порами, то можно записать уравнение баланса пористости [7]:

$$p_2 = p_{02} + F(I_\sigma^2)(1 - p_{02}). \quad (13)$$

Согласно формуле (10), напряжения в скелете матрицы $\langle \sigma_{ij}^2 \rangle$ можно выразить через макродеформации всего композита $\langle \varepsilon_{kl} \rangle$. Подставляя (10), (11) в (13), получим систему уравнений для определения текущей пористости матрицы p_2 , характеризующую микроповреждаемость, возникающую под воздействием приложенных деформаций:

$$p_2 = p_2(\langle \varepsilon_{kl} \rangle). \quad (14)$$

Затем, подставляя p_2 вместо p_{02} в уравнения (2)–(13), получим нелинейные зависимости между макронапряжениями $\langle \sigma_{ij} \rangle$ и макродеформациями $\langle \varepsilon_{kl} \rangle$, где нелинейность обусловлена микроразрушениями матрицы, с учетом разброса прочности материала.

3. На основе предложенной модели приводим решение задачи о напряженно-деформируемом состоянии упругого композита, армированного двумя различными типами включений с трансверсально-изотропной симметрией упругих свойств. Предполагается, что матрица имеет начальную пористость, которая характеризует повреждаемость. Рассматривается случай одноосного нагружения материала при задаваемых деформациях. В процессе деформирования в матрице происходит накопление повреждений и, начиная с определенного момента, она начинает разрушаться. Для решения такой задачи предлагается численно-аналитический алгоритм, который базируется на решении стохастических уравнений теории упругости методом условных моментных функций [4] с последующим применением комбинированного итерационного метода для решения трансцендентного уравнения.

Решение полученного трансцендентного уравнения, которое описывается соотношениями (2)–(13), можно получить на основании следующей итерационной схемы:

- Пористость матрицы в n -м приближении $p_2^{(n)}$ определяется как функция предельного значения интенсивности средних касательных напряжений в каркасе связующего в n -м приближении $k_2^{(n)}$, а, значит, она зависит от интенсивности средних касательных напряжений скелета матрицы в n -м приближении $J_\sigma^{2(n)}$.
- В свою очередь, интенсивность средних касательных напряжений скелета согласно соотношениям (5)–(10) зависит от макродеформаций $\langle \varepsilon_{pq} \rangle$, эффективных упругих модулей композита в $(n-1)$ -м приближении $\lambda_{ij}^{**(n-1)}$ и от текущей пористости матрицы в $(n-1)$ -м приближении $p_2^{(n-1)}$.
- Эффективные упругие модули композита являются функцией текущей пористости матрицы в $(n-1)$ -м приближении $p_2^{(n-1)}$ согласно уравнениям (2), (4).

Таким образом, на основании зависимостей (12), (13) можем записать уравнение баланса пористости:

$$p_2^{(n-1)} = p_{02} + (1 - p_{02})F(k_2^{(n-1)}), \quad (15)$$

где

$$F(k_2^{(n-1)}) = \begin{cases} 0, & k_2^{(n-1)} < k_0, \\ 1 - \exp(-n(k_2^{(n-1)} - k_0)^\alpha), & k_2^{(n-1)} \geq k_0. \end{cases} \quad (16)$$

В соответствии с выражениями (2)–(11) величина $k_2^{(n-1)}$ в $(n-1)$ -м приближении зависит от макродеформаций $\langle \varepsilon_{pq} \rangle$, эффективных упругих модулей композита $(n-1)$ -м приближении $\lambda_{ij}^{**(n-1)}$ и от пористости $p_2^{(n-1)}$ в $(n-1)$ -м приближении:

$$k_2^{(n-1)} = J_\sigma^{2(n-1)} = J_\sigma^{2(n-1)} \left(\lambda_{ij}^{**(n-1)}, p^{(n-1)}, \langle \varepsilon_{ij} \rangle \right), \quad (17)$$

в то время, как компоненты тензора эффективных упругих модулей всего композита можно определить на основании соотношений (2)–(4), которые в явном виде приведены в [4]:

$$\lambda_{ij}^{**(n-1)} = \lambda_{ij}^{**(n-1)} (\lambda_{k\ell}^{[1,1]}, \lambda_{k\ell}^{[1,2]}, \lambda_{k\ell}^{[2]}, c_{11}, c_{12}, t, p_2^{(n-1)}). \quad (18)$$

Следовательно, уравнения (11)–(18) позволяют определить эффективные упругие характеристики пористого трансверсально-изотропного композита в зависимости от макродеформаций

$$\lambda_{ij}^{**} = \lim_{n \rightarrow \infty} \lambda_{ij}^{**(n)} (\langle \varepsilon_{k\ell} \rangle). \quad (19)$$

Таким образом, задавая макродеформации, которым подвергается материал, и определив его эффективные упругие характеристики, можно определить макронапряжения, возникающие в таких композитных материалах.

4. Используя вышеизложенную методику и полученные соотношения для определения текущей пористости материала, в качестве примера построим нелинейную диаграмму макродеформирования и исследуем поведение композита на основе эпоксидной матрицы, упрочненной угольными волокнами и зернистыми включениями из алюмоборосиликатного стекла при одноосном нагружении:

$$\langle \varepsilon_{11} \rangle \neq 0,$$

при заданных упругих характеристиках угля и стекла соответственно:

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^{[1,1]} &= 263 \text{ ГПа}, & \lambda_{33}^{[1,1]} &= 283 \text{ ГПа}, & \lambda_{13}^{[1,1]} &= 133 \text{ ГПа}, \\ \lambda_{12}^{[1,1]} &= 152 \text{ ГПа}, & \lambda_{44}^{[1,1]} &= 52 \text{ ГПа}, & & \\ E^{[1,2]} &= 70 \text{ ГПа}, & \nu^{[1]} &= 0.2 & & \end{aligned}$$

и упругих постоянных матрицы (эпоксид):

$$E_2 = 3 \text{ ГПа}, \quad \nu_2 = 0.382,$$

для объемной концентрации включений, начальном содержании пор в матрице и параметре t , характеризующем форму сфероидальных включений:

$$c_{11} = 0.3, \quad c_{12} = 0.1, \quad p_{02} = 0, 0.2, 0.4, \quad t = 1,$$

а также при заданных параметрах функции распределения прочности:

$$\alpha = 2, \quad n = 10^2, 10^3, 2 \cdot 10^4, \quad k_0 = 0.015 \text{ ГПа}.$$

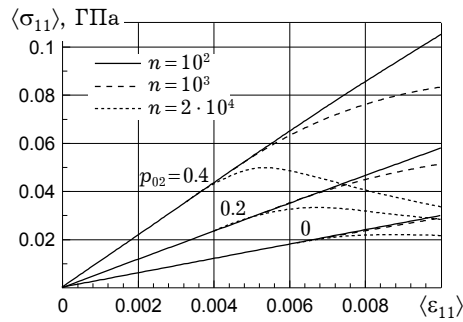


Рис. 1. Диаграмма зависимости $\langle \sigma_{11} \rangle$ от $\langle \varepsilon_{11} \rangle$ при различных значениях начальной пористости и параметров, характеризующих функцию распределения разброса прочности.

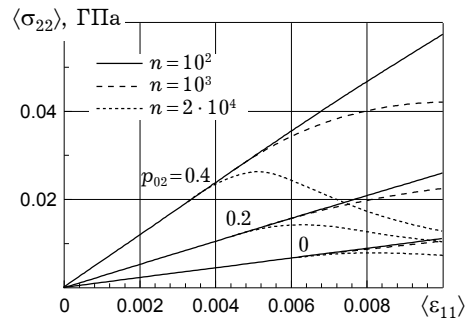


Рис. 2. Диаграмма зависимости $\langle \sigma_{22} \rangle$ от $\langle \varepsilon_{11} \rangle$ при различных значениях начальной пористости и параметров, характеризующих функцию распределения разброса прочности.

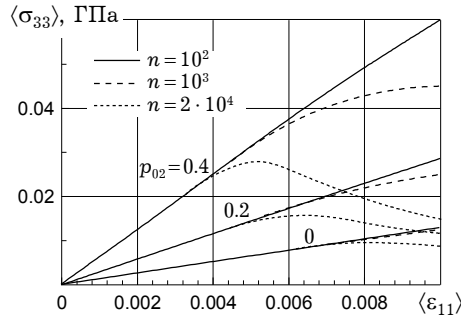


Рис. 3. Диаграмма зависимости $\langle \sigma_{33} \rangle$ от $\langle \varepsilon_{11} \rangle$ при различных значениях начальной пористости и параметров, характеризующих функцию распределения разброса прочности.

На рис. 1–3 приведены нелинейные диаграммы напряженно-деформируемого состояния для напряжений $\langle \sigma_{11} \rangle$, $\langle \sigma_{22} \rangle$ и $\langle \sigma_{33} \rangle$ в зависимости от $\langle \varepsilon_{11} \rangle$ при различных значениях начальной пористости матрицы p_{02} и параметра функции распределения прочности n . На диаграммах сплошной линией обозначены кривые, учитывающие разброс прочности материала матрицы с параметрами $\alpha = 2$, $n = 100$, штриховой линией – кривые, учитывающие разброс прочности с параметрами $\alpha = 2$, $n = 10^3$, точечной ли-

нией – кривые, учитывающие разброс прочности с параметрами $\alpha = 2$, $n = 2 \cdot 10^4$. Из графиков видно, что кривые, учитывающие разброс прочности, являются гладкими, без изломов, что отражает реальные процессы, причем, варьируя параметры n и α для каждого конкретного случая, теоретическую кривую макродеформирования можно максимально приблизить к экспериментальной. Кроме того, из графиков также видно, что кривые, полученные с учетом разброса прочности материала, учитывают влияние начальной пористости p_{02} на поведение композита после начала образования микрповреждений, что также соответствует реальным кривым, полученным экспериментально [3]. Более того, можно сделать вывод, что начальная пористость существенно влияет на поведение материала после начала разрушения.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенный подход, базирующийся на методе условных моментных функций и методе секущих, позволяет исследовать нелинейные деформативные свойства и напряженно-деформированное состояние зернисто-волокнутого композита стохастической структуры, компоненты которого обладают трансверсально-изотропной симметрией упругих свойств. В данном случае нелинейность деформативных свойств обусловлена накоплением повреждений в матрице композита, находящегося под воздействием приложенных макродеформаций. Эффективные упругие модули зависят от упругих свойств компонентов их объемных концентраций, формы включений, начальной пористости матрицы и величины приложенной деформации.

1. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. – Москва: Наука, 1974. – 311 с.
2. Назаренко Л. В. Влияние микроразрушений на деформативные свойства анизотропных материалов // Доп. НАН України. – 1999. – № 10. – С. 63–67.
3. Тамуж В. П., Куксенко В. С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. – Рига: Зинатне, 1978. – 294 с.
4. Хорошун Л. П., Маслов Б. П., Шикюла Е. Н., Назаренко Л. В. Статистическая механика и эффективные свойства материалов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 390 с. – (Механика композитов: В 12 т. – Т. 3.)
5. Desrumeaux F., Meraghni F., Benzeggagh L. Generalised Mori-Tanaka scheme to model anisotropic damage using numerical Eshelby tensor // J. Composite Material. – 2001. – **35**, No. 7. – P. 603–623.
6. Khoroshun L. P. Methods of the theory of random functions in determining the macroscopic properties of microheterogeneous media // Int. Appl. Mech. – 1978. – **14**, No. 2. – P. 3–17.
7. Khoroshun L. P. Principles of the micromechanics of material damage. 1. Short-term damage // Int. Appl. Mech. – 1998. – **34**, No. 10. – P. 120–127.
8. Khoroshun L. P., Nazarenko L. V. Deformation and microdamaging of discretely-fibrous composites with transversally-isotropic components // Int. Appl. Mech. – 2003. – **39**, No. 6. – P. 696–703.
9. Khoroshun L. P., Shikula E. N., Short-term microdamageability of laminated materials under thermal actions // Int. Appl. Mech. – 2002. – **38**, No. 4. – P. 432–439. (Прикл. механика. – 2002. – **38**, № 4. – С. 60 – 68).
10. Khoroshun L. P., Shikula E. N. Short-term microdestructions of fibrous materials with transversally isotropic fibers under temperature influences // Int. Appl. Mech. – 2002. – **38**, No. 6. – P. 74–83.
11. Nazarenko L. V. Deformation of composites with arbitrarily oriented orthotropic fibers under matrix microdamages // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2008. – **51**, № 4. – С. 181–192.
12. Nazarenko L. V. Deformation of orthotropic composites with unidirectional ellipsoidal inclusions under matrix microdamages // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2008. – **51**, № 1. – С. 121–130.
13. Nazarenko L. V. Elastic properties of materials with ellipsoidal pores // Int. Appl. Mech. – 1996. – **32**, No. 1. – P. 46–53.

**ДЕФОРМАТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗЕРНИСТО-ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТІВ
ПРИ МІКРОПОШКОДЖУВАНOSTІ МАТРИЦІ**

Модель короткочасної мікропошкоджуваності узагальнюється на випадок трикомпонентного композитного матеріалу, за який вибрано ізотропну матрицю, стохастично армовану односпрямовано орієнтованими нескінченними волокнами і сфероїдальними включеннями. Вважається, що включення мають різні пружні властивості з трансверсально-ізотропною симетрією. Також приймаємо, що під дією макродеформацій в матриці нагромаджуються мікропошкодження, які моделюються порожніми порами. Критерій руйнування в мікрооб'ємі приймається у формі Губера – Мізеса, де границя міцності є випадковою функцією координат із степеневим розподілом або розподілом Вейбулла. Напружено-деформований стан та ефективні властивості матеріалу з мікропошкодженнями визначаються на основі стохастичних рівнянь теорії пружності для матеріалів на основі ізотропної матриці і односпрямовано орієнтованих трансверсально-ізотропних сфероїдів. Замикання рівнянь деформування і мікропошкоджуваності здійснюється на основі рівнянь балансу (пористості) компонентів. Побудовано нелінійні діаграми макродеформування таких матеріалів від макродеформацій.

**DEFORMATIVE PROPERTIES OF GRANULAR-FIBER COMPOSITES
UNDER MATRIX MICRODAMAGING**

The model of nonlinear deformation of stochastic composites under microdamaging is developed for the case of three components composite of stochastic structure with an isotropic matrix strengthened by the unidirectional unlimited fibres and spheroidal inclusions. It is assumed that the fibres and inclusions have different elastic properties of transversally-isotropic symmetry. It is considered a case when the microdamages are accumulated in the matrix. Fractured microvolumes are modelled by a system of randomly distributed quasi spherical pores. The porosity balance equation and relations for determining the effective elastic modules for the case of transversally-isotropic components are taken as a basic relations. The fracture criterion is assumed to be given as the limit value of the intensity of the average shear stresses occurring in the undamaged part of the material. Basing on the analytical and numerical approach the algorithm for determination of the nonlinear deformative properties of such a material is constructed. The nonlinearity of composite deformations is caused by the finiteness of the matrix deformations. Using the numerical solution the nonlinear stress-strain diagrams for a specific three components composite are predicted and discussed.

Ин-т механики им. С. П. Тимошенко
НАН Украины, Киев

Получено
20.02.08