

КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

Вильдеман В. Э., Рочев И. Н. (Пермь)

Abstract

The object of the present paper is to consider the mathematical modeling of the nonlinear deformation and fracture processes in matrix during transversal loading of the unidirectional fiber-reinforced composites on the postcritical deformation stage. A top-point on the stress-strain diagram corresponds to the critical state. The postcritical deformation stage, characterized by decrease of stress with increase of strain is a result of equilibrium damage accumulation in heterogeneous media.

Mechanical properties of matrix material at damaged zones were varied according to values of stress tensor invariants. Effects due to the structural damage, such as leaps and the descending branch of macrostress-macrostrain diagram or local unloading and repeated loading of structural elements during macrolevel loading, are illustrated.

Важной особенностью механического поведения структурно-неоднородных материалов под нагрузкой является закритическая стадия деформирования, сопровождаемая падением напряжений при прогрессирующих деформациях [1,2]. Причиной разупрочнения деформируемых сред является деструкция различной природы, например, разрушение отдельных элементов структуры: волокон [3] или слоев [4], фазовые превращения и динамическая рекристаллизация [5].

В плане анализа механизмов закритической деформации на основе математического моделирования рассмотрим процессы структурного разрушения волокнистых композитов регулярной структуры с упругопластической матрицей при нагружении в поперечной плоскости.

Вопросы неупругого деформирования волокнистых композитов постоянно привлекают внимание исследователей. В частности, получили распространение численные методы моделирования, которые позволяют представить среду в виде системы дискретных элементов и рассматривать диссипативные процессы: как многошаговые повреждения структуры модели с учетом существенно неоднородного распределения структурных напряжений и деформаций [6-9].

Рассмотрим периодическую задачу теории малых упругопластических деформаций для рассматриваемой неоднородной среды матричного типа с регулярной структурой, состоящей из уравнений равновесия

$$\sigma_{n,i} = 0, \quad (1)$$

геометрических соотношений Коши

$$\varepsilon_n = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (2)$$

определяющих соотношений при активном нагружении

$$\sigma_n = \left[K \delta_{ij} \delta_{kl} + G(1 - g) \left(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \delta_{kl} \right) \right] \varepsilon_{kl}, \quad (3)$$

линейных уравнений связи приращений напряжений и деформаций при разгрузке.

Модуль объемного сжатия $K(\bar{r})$ и модуль сдвига $G(\bar{r})$ являются кусочно-однородными периодическими функциями. Пусть \bar{a} - вектор трансляции, смещением на который ячейки периодичности можно синтезировать структуру материала. Условия периодичности для искоемых полей деформирования

$$u_i(\bar{r}) = u_i(\bar{r} + \bar{a}), \quad \varepsilon_{ij}(\bar{r}) = \varepsilon_{ij}(\bar{r} + \bar{a}), \quad \sigma_{ij}(\bar{r}) = \sigma_{ij}(\bar{r} + \bar{a}) \quad (4)$$

и заданные макродеформации

$$\varepsilon_{ij}^* = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij} dV, \quad (5)$$

определяющие условия в перемещениях на границе ячейки периодичности V

$$u_i|_1 = \varepsilon_{ij}^* r_j, \quad (6)$$

позволяют выделить единственное решение системы (1-3) при определенном виде функции неупругого деформирования g .

Пусть для упругого волокна $g=0$, для матрицы g является функцией второго инварианта тензора деформаций $j_\varepsilon^{(2)}$ и описывает поведение упругопластического материала с линейным упрочнением:

$$g = \begin{cases} 0, & j_\varepsilon^{(2)} \leq j_{\varepsilon_r}^{(2)}, \\ (1 - G'/G) \left(1 - j_\varepsilon^{(2)} / j_{\varepsilon_r}^{(2)} \right), & j_\varepsilon^{(2)} > j_{\varepsilon_r}^{(2)}, \end{cases} \quad (7)$$

$$j_\varepsilon^{(2)} = \sqrt{\bar{\varepsilon}_{ij} \bar{\varepsilon}_{ij}}, \quad \bar{\varepsilon}_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij},$$

где $j_{\varepsilon_r}^{(2)}$ - предел упругости, G - модуль сдвига и G' - модуль упрочнения.

Кроме того, дополним постановку задачи условием разрушения материала матрицы. При достижении вторым инвариантом тензора деформаций своего критического значения

$$j_\varepsilon^{(2)} \geq j_{\varepsilon_{kp}}^{(2)} \quad (8)$$

материал матрицы теряет способность сопротивляться формоизменению ($g=1$), сохраняя лишь способность сопротивляться гидростатическому сжатию

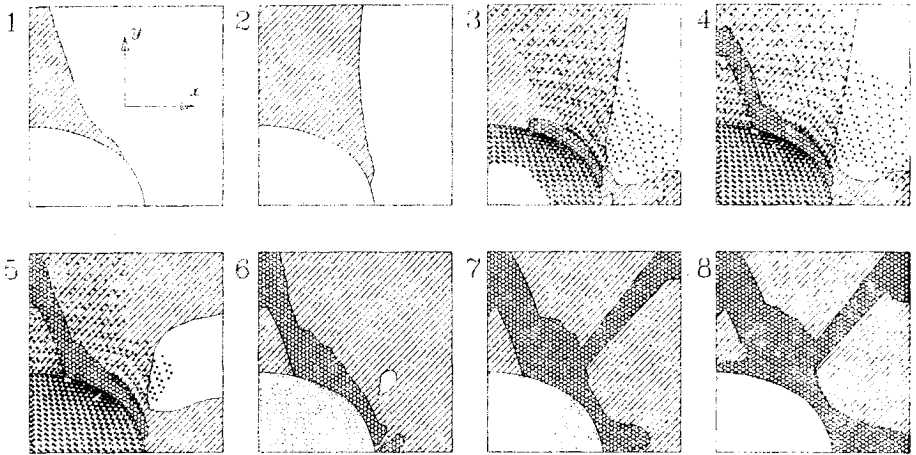
$$K = \begin{cases} 0, & j_\varepsilon^{(1)} > 0, \\ K, & j_\varepsilon^{(1)} \leq 0, \end{cases} \quad (9)$$

$$j_\varepsilon^{(1)} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}.$$

Последовательное решение рассмотренной краевой задачи при различных уровнях макродеформаций позволяет в рамках вычислительного эксперимента проследить кинетику структурного разрушения композиционного материала и вызванное этим процессом изменение его эффективных свойств, характеризуемых связью макродеформаций ε_{ij}^* и макронапряжений

$$\sigma_{ij}^* = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV. \quad (10)$$

Численные расчеты были проведены методом конечных элементов для симметричной части ячейки периодичности находящегося в условиях плоского



$-\sigma_y^* - \sigma_x^*$, МПа

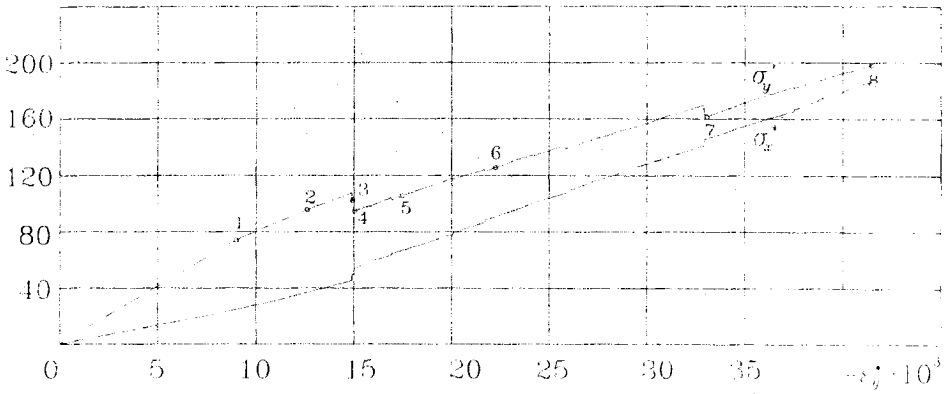




Рис. 1 Кинетика разрушения упругопластической матрицы при деформировании волокнистого композита ($\varepsilon_x^* = 0$, $\varepsilon_y^* < 0$):

 - зона пластичности;  - зона разрушения

деформированного состояния композита с тетрагональным расположением эллиптических в поперечном сечении волокон при следующих характеристиках:

$$G_m = 2.1 \times 10^3 \text{ МПа}, G_m' = 0.05 \times G_m, K_m = 3.5 \cdot 10^3 \text{ МПа}, J_{\varepsilon_f}^{(2)} = 0.01.$$

$$J_{\varepsilon_{кр}}^{(2)} = 0.025, G_f = 2.1 \times 10^5 \text{ МПа}, \nu_f = 0.25.$$

Индексами m и f отмечены характеристики соответственно матрицы и волокон.

Исследуемая область была разбита на 1150 треугольных конечных элементов. Линеаризация рассмотренных определяющих соотношений осуществлялась с использованием метода дополнительных напряжений при поэтапных нагружениях [10,11]. Решение краевой задачи производилось при пропорциональном увеличении (или уменьшении) компонент тензора макродеформаций с шагом от 3×10^{-6} до 3×10^{-5} .

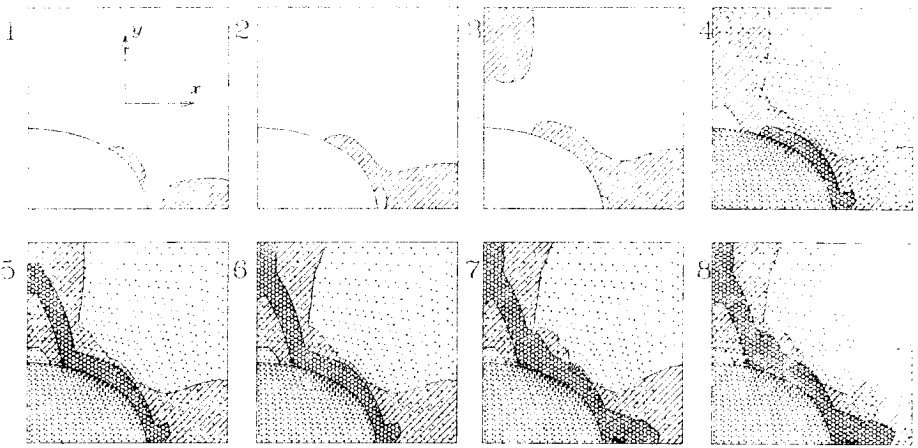
На рис. 1 показана последовательность возникновения и развития зон пластичности и разрушения в матрице при одноосной деформации сжатия волокнистого композита (объемная доля волокон 0.188, отношение полуосей эллипса 2/3). Здесь и далее состояния материала, отмеченные на диаграммах, характеризуются формой и расположением зон неупругого деформирования, показанных на изображениях фрагментов ячейки периодичности с соответствующими номерами.

Как видим, необратимые изменения в структуре материала приводят к нелинейности на диаграмме деформирования. Скачкообразное подрастание зон разрушения на некоторых этапах деформирования вызывает появление срывов на диаграмме. Точками отмечены конечные элементы, в которых происходит упругая разгрузка среды по второму инварианту ($dJ_e^{(2)} < 0$), что объясняется перераспределением напряжений в процессе структурного разрушения. Обнаруженное явление локальной разгрузки при активном деформировании композита более детально исследовано в работах [4,12]. В данном случае, вклад матрицы в сопротивление внешней нагрузке на заключительной стадии деформирования композита ограничивается, в основном, ее сопротивлением уменьшению объема. Этим и объясняется сближение значений макронапряжений σ_x^* и σ_y^* .

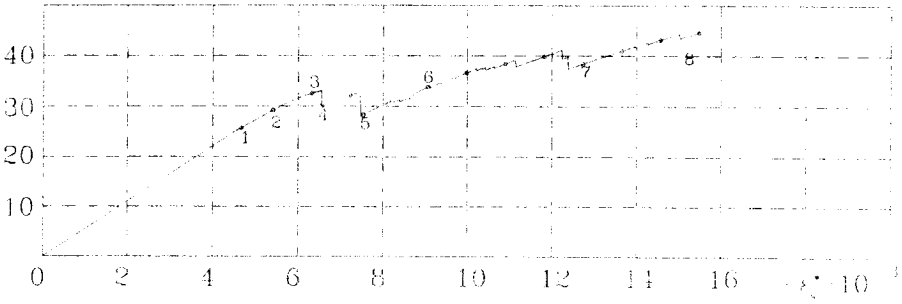
На рис. 2 показаны диаграммы и основные этапы деформирования композита при чистом формоизменении (равновеликая двухосная деформация, растягивающая в направлении оси x и сжимающая вдоль оси y). На диаграмме зависимости макронапряжений от макродеформаций в данном случае появляется ниспадающая ветвь. Разупрочнение композита вызвано процессом структурного разрушения. При этом обнаружено чередование постепенного и скачкообразного подрастания зоны разрушения при монотонном макродеформировании.

Обращает на себя внимание прохождение зависимости $\sigma_x^*(\epsilon_x^*)$ через нулевую отметку на оси ординат при увеличении деформации. Смена знака макронапряжений σ_x^* свидетельствует о том, что, вследствие развития зоны разрушения в матрице, теперь уже композит, в свою очередь, теряет способность сопротивляться формоизменению.

Кроме отмеченного эффекта локальной разгрузки, проведенные расчеты выявили процессы повторной нагрузки пластических элементов, что приводит к уменьшению зоны упругой разгрузки. Например, это явление проявилось при переходе от состояния, помеченного цифрой 6, к состоянию - 7 (см. на рис. 2).



$-\sigma_y^*$, МПа



σ_x^* , МПа

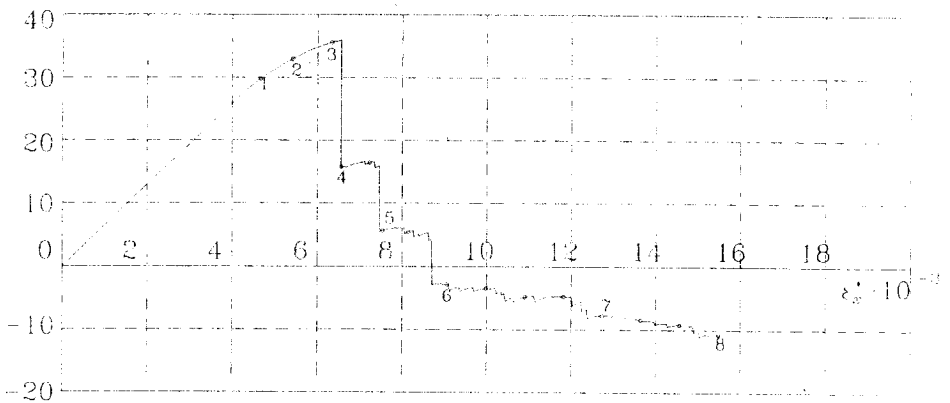


Рис. 2 Кинетика разрушения упругопластической матрицы на закритической стадии деформирования волокнистого композита ($\epsilon_x^* = -\epsilon_y^*$):

▨ - зона пластичности; ▩ - зона разрушения

Результаты расчетов показали, что увеличение доли волокон в объеме композита до 0,377 не приводит к существенному изменению характера деформирования. Как и в рассмотренных случаях, начальная стадия разрушения матрицы связана с объемом материала вблизи межфазной границы, хотя отмечено и образование небольшой изолированной зоны разрушения в матрице. Кроме того, в качестве особенностей можно отметить появление ниспадающей ветви на диаграмме $\sigma_y^*(\varepsilon_y^*)$ при макродеформировании по схеме $\varepsilon_x^* = -0.5\varepsilon_y^* > 0$ и более локализованное развитие зон пластичности и разрушения.

Таким образом, полученные результаты математического моделирования позволяют сделать вывод о возможности равновесного протекания взаимосвязанных процессов упругопластического деформирования и разрушения, сопровождаемых локальными явлениями упругой разгрузки и повторного нагружения, в структуре однонаправленных волокнистых композитов при заданных программах деформирования. Возникающая при этом нелинейность диаграмм макродеформирования в отдельных случаях настолько велика, что имеет место ниспадающая ветвь, а величины компонент тензора макронапряжений могут не только снижаться до нуля, но и менять свой знак.

Библиографический список

1. Стружанов В.В., Миронов В.И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. Екатеринбург: Изд-во НИСО УрО РАН, 1995. 181 с.
2. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Краевая задача механики деформирования и разрушения поврежденных тел с зонами разупрочнения // ПМТФ. - 1995. - Т.36. №6. - С. 122-132.
3. Разрушение конструкций из композитных материалов / Н.В. Грушецкий, И.П. Дмитриенко, А.Ф. Ермоленко и др.; Под ред. В.П. Тамужа, В.Д. Протасова. - Рига: Зинатне, 1986. - 264 с.
4. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Прогнозирование неупругого деформирования и разрушения слоистых композитов // Механика композит. материалов. -1992. -№3. -С. 315-323
5. Васин Р.А., Еникеев Ф.У., Мазурский М.И. О материалах с падающей диаграммой // МТТ. - 1995. - С. 181-182.
6. Скудра А.М., Булаве Ф.Я. Прочность армированных пластиков. - М.: Химия, 1982. - 216 с.
7. Адамс Д.Ф. Упругопластическое поведение композитов // Композиционные материалы Т.2: Механика композиционных материалов - М.: Мир, 1978. - С. 196-241.
8. Соколкин Ю.В., Свисткова Л.А. Упругопластичность волокнистых композитов с металлической матрицей // Исследования по механике материалов и конструкций. - Свердловск: УрО АН СССР, 1988. -С. 35-92.
9. Аношкин А.Н., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Неупругое деформирование и разрушение разупрочненных волокнистых композитов // Механика композит. материалов. -1993. -Т.29. №5. -С. 621-628.
10. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. - М.: Мир, 1975. -541 с.
11. Ильюшин А.А. Пластичность. - М.: Гостехиздат, 1948. -376 с.
12. Вильдеман В.Э. Эффект локальной разгрузки при активном деформировании композита // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных материалов. -Свердловск: УрО АН СССР, 1992. -С. 102-106