

УДК 620.1:539.4

Скачков В. А.

ДЕФОРМАЦИОННАЯ АНИЗОТРОПИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО ТИПА

В процессе работы триботехнических сопряжений фрикционные элементы подвержены сложному, непропорциональному нагружению. При этом формируется деформационная анизотропия фрикционного многокомпонентного композиционного элемента и создаются условия его преждевременного разрушения. Оценка макроскопических и микроструктурных напряжений, а также процесса накопления микроповреждений становится актуальной проблемой.

Вопросы сложного нагружения подробно рассмотрены в работах [1–5]. Из анализа следует, что при сложном нагружении наиболее полно исследовано поведение поликристаллических металлов и их сплавов как имеющих, так и не имеющих площадки текучести. Процесс сложного нагружения композиционных материалов исследован далеко не достаточно [3, 4].

Фрикционные пары работают в условиях сложного, непропорционального нагружения. Для таких пар трения постоянно приложено контактное давление, обеспечивающее формирование силы трения. Сила трения при разгоне направлена в сторону направления вращения, при торможении – в обратную сторону. При таком режиме работы фрикционной пары происходит более ускоренное разрушение фрикционного элемента, обычно представляющего собой многокомпонентный композиционный материал.

Сложность поведения композитных материалов при нагружении обусловлена процессом накопления структурных повреждений [6, 7]. При этом имеет место как объемное разрушение (образование нарушений сплошности типа пор), так и образование двумерных дефектов типа микротрещин. Процесс объемного разрушения приводит к изменению механических свойств композитных материалов с сохранением их симметрии. Образование микротрещин, ориентированных относительно главных напряжений, обуславливает в общем случае не только изменение механических свойств, но и преобразование композита в тело с криволинейной анизотропией.

Цель работы – с позиций микромеханики многокомпонентных структурно-неоднородных тел построить методику и алгоритм расчета микроструктурных напряжений, уровня накопленных микроповреждений и деформационной анизотропии, обусловленных изменением модулей упругости по пространственным координатам в условиях сложного нагружения.

Основная часть. Многокомпонентный композиционный материал моделируется средой класса B_2 , в рамках которой выделяются элементы как первого так и второго порядка малости [8]. Для описания процесса накопления двух- и трехмерных повреждений по аналогии с работами [6, 7] введем случайную тензорную функцию микроповреждаемости:

$$\Psi_{ijmn}(\vec{r}, S, \xi) = P_o(\vec{r}, S, \xi) I_{ijmn} + P_{ijmn}(\vec{r}, S, \xi), \quad (1)$$

где $P_o(\vec{r}, S, \xi)$ – скалярная случайная функция, описывающая накопление трехмерных дефектов;

P_{ijmn} – случайная тензорная функция, описывающая накопление двумерных дефектов;

ξ, S – случайные тензоры микронапряжений и прочности структурных элементов композита;

I_{ijmn} – единичный тензор четвертого ранга.

Компоненты случайной тензорной функции (1) однозначно определяются распределением микронапряжений и тензором прочности структурных элементов. В общем случае нагружения, когда главные оси симметрии структурных элементов не совпадают с направлениями

главных напряжений, тензор Ψ_{ijmn} не симметричен и его компонентами являются 36 случайных функций. В ряде частных случаев симметрия функции (1) увеличивается. Так, например, для композитов с изотропными компонентами справедливы условия симметрии:

$$\Psi_{ijmn} = \Psi_{mnij} = \Psi_{jimn} = \Psi_{ijnm} = \Psi_{nmij} = \Psi_{nmji}.$$

Упругие свойства многокомпонентных композитов с учетом повреждаемости структуры описываются моделью статической смеси:

$$\theta_{ijmn} = \sum_{K=1}^N \theta_{ij\alpha\beta}^K \left(I_{\alpha\beta mn} - \Psi_{\alpha\beta mn}^K(\vec{r}, S, \xi) \right) \lambda^K(\vec{r}), \quad (2)$$

где θ_{ijmn}^K , Ψ_{ijmn}^K – случайные тензоры модулей упругости и повреждаемости компонента K ;

$\lambda^K(\vec{r})$ – индикаторная функция;

N – число компонентов в композите.

Из соотношения (2) следуют важные представления, раскрывающие смысл деформационной анизотропии упругих свойств композитов. Если все θ_{ijmn}^K изотропны, а внешнее нагружение обеспечивает некоторым функциям Ψ_{ijmn}^K три плоскости симметрии, то композит будет соответствовать ортотропному упругому телу. Если внешнее нагружение обеспечивает некоторым функциям Ψ_{ijmn}^K одну плоскость симметрии, то композит будет соответствовать транстропному телу.

Принципиально возможным представляется случай, когда система внешних сил обеспечивает такое формирование функций Ψ_{ijmn}^K , которые преобразуют анизотропные материалы в изотропные.

Для определения компонент случайных тензорных функций микроповреждаемости и статистических параметров микронапряжений и микродеформаций ставится статистическая краевая задача микромеханики композитов, связанная по процессам деформирования и разрушения:

$$\xi_{i\alpha,\alpha} = 0; \quad \xi_{ij} = \sum_{K=1}^N \theta_{ij\alpha\beta}^K \left(I_{\alpha\beta\gamma\delta} - \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta}^K \right) \lambda^K \varepsilon_{\gamma\delta}; \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\chi_{i,j} + \chi_{j,i}); \quad \chi_i|_r = \chi_i^r, \quad (3)$$

где χ_i, χ_i^r – вектор случайных перемещений в объеме тела и на его границе;

ε_{ij} – тензор случайных микродеформаций.

Краевая задача (3) с использованием функции Грина $G_{ij}(\vec{r}, \vec{r}')$ приводится к системе интегро-дифференциальных уравнений:

$$\overset{o}{\chi}_{i,j} = \int_V G_{i\alpha,j}(\vec{r}, \vec{r}') \overset{o}{I}'_{\alpha\beta,\beta}(\vec{r}') dV', \quad (4)$$

где

$$P_{ij} = \theta_{ij\alpha\beta} \langle \chi_{\alpha,\beta} \rangle + \overset{o}{\theta}_{ij\alpha\beta} \overset{o}{\chi}_{\alpha,\beta} - \theta_{ij\alpha\beta} \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta} \chi_{\gamma,\delta} + \langle \theta_{ij\alpha\beta} \rangle \langle \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta} \rangle \chi_{\gamma,\delta} + \langle \overset{o}{\theta}_{ij\alpha\beta} \overset{o}{\Psi}_{\alpha\beta\gamma\delta} \rangle \overset{o}{\chi}_{\gamma,\delta};$$

$$\overset{o}{\theta}_{ijmn} = \theta_{ijmn} - \langle \theta_{ijmn} \rangle;$$

$\langle \dots \rangle$ – оператор статистического осреднения.

Решение (4) в предположении статистической независимости Ψ и θ с учетом только средних значений Ψ , можно записать в виде:

$$\overset{o}{\chi}_{i,j} = \left[\sum_{l=0}^{\infty} \langle \theta_{ij\alpha\beta} \rangle \left(I_{\alpha\beta\gamma\delta} + \langle \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta} \rangle \right) \sum_{K=1}^{l+1} \rho_{\gamma\omega\varphi,\delta}^K + \overset{o}{\theta}_{ij\alpha\beta} \langle \Psi_{\alpha\beta\omega\varphi} \rangle \right] \varepsilon_{\omega\varphi}, \quad (5)$$

$$\text{где } \rho_{imn,j}^1 = \int_V G_{i\alpha,j} \overset{o}{\theta}'_{\alpha\beta mn, \beta_{K-1}} dV';$$

$$\rho_{imn,j}^K = \int_V G_{i\alpha,j} \left(\overset{o}{\theta}_{\alpha\beta\gamma\delta} \rho_{\gamma mn, \delta} \right)_{,\beta'} dV'.$$

Следовательно, решение (5) позволяет определить моментные функции распределения микродеформаций, микронапряжений и средние значения функции микроповреждаемости.

Макроскопическое разрушение композитных материалов описывается макроскопическими функциями повреждаемости Ψ_{ijmn}^I , которые определяются объемным осреднением функций микроповреждаемости:

$$\Psi_{ijmn}^I = \frac{1}{\Delta^I V} \int_{\Delta^I V} \psi_{ijmn}(\vec{r}, S, \xi) d^I V, \quad (6)$$

где $\Delta^I V$ – элемент структуры композита первого порядка малости.

При этом макроскопическое разрушение наступает при нарушении неравенства:

$$\Psi_{ijmn}^I - C_{ijmn}^\omega \leq 0,$$

где C_{ijmn}^ω – тензор критических значений функции макроповреждаемости.

Для макроскопически изотропного композита тензор C_{ijmn}^ω определяется соотношением:

$$C_{ijmn}^\omega = C_1^\omega \delta_{ij} \delta_{mn} + C_2^\omega (\delta_{im} \delta_{jn} + \delta_{in} \delta_{jm}).$$

Постоянные C_1^ω и C_2^ω находятся из опытов на одноосное растяжение и чистый сдвиг:

$$C_1^\omega = [l \cdot m \cdot e_{11}^B - \sigma_{11}^B (l + m)] / 3l \cdot m;$$

$$C_2^\omega = [m \cdot e_{12}^B - \sigma_{12}^B] / 2m,$$

где l и m – постоянные Ламе;

$e_{11}^B, \sigma_{11}^B, e_{12}^B, \sigma_{12}^B$ – предельные макроскопические деформации и напряжения при растяжении и сдвиге соответственно.

Для реализации предложенного подхода разработана Паскаль-программа. Программа позволяет осуществлять расчеты при деформировании слоистых анизотропных композиционных материалов при плоском напряженном состоянии, траектория нагружения которых в фазовом пространстве главных деформаций может быть аппроксимирована многозвенной ломаной линией.

Для оценки точности разработанного алгоритма проведены тестовые расчеты, сопоставимые с опытными данными работы [3]. Результаты тестовых расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение расчетных и опытных значений напряжений для волокнистых композитов с армированием $\pm 45^\circ$ (10-1МПА)

Путь нагружения	Вид данных	1 этап			2 этап			3 этап		
		α	σ_{11}	σ_{22}	α	σ_{11}	σ_{22}	α	σ_{11}	σ_{22}
	Расчет	63	8,97	16,80	180	-5,69	0	111	1,39	4,95
	Опыт	63	9,91	19,86	180	-6,50	0	112	2,28	5,76
	Расчет	45	12,50	12,50	180	-6,18	0	91	0,04	6,72
	Опыт	45	14,81	14,78	180	-7,04	0	91	0,11	7,74
	Расчет	180	-7,09	0	28	17,39	9,47	0	7,09	0
	Опыт	180	-8,05	0	28	20,02	10,84	0	8,03	0

Из табл. 1 следует, что максимальное отклонение расчетных значений от опытных составляет 18 %.

Разработанный подход апробирован при расчете напряженно-деформированного состояния двухкомпонентных волокнистых композитов. Волокнистый наполнитель ориентирован под углом $\pm 30^\circ$ к координате x_1 . Траектории нагружения композита заданы многозвеньевыми ломаными линиями. Траектории нагружения в фазовом пространстве деформаций имеют общие точки.

Одна траектория показана сплошной линией, другая – штриховой.

Степень анизотропии оценивалась по формуле:

$$\beta = \frac{E_1}{E_2},$$

где E_1 и E_2 модули упругости по оси x_1 и x_2 .

Начальная степень анизотропии волокнистого композита $\beta_0 = 1,303$.

Результаты расчета представлены в табл. 2. и на рис. 1. Общие точки траекторий нагружения обозначены цифрами от 1 до 6. Для точки 1 степень анизотропии отличается для сплошной и штриховой траектории на 6,5 %, для точки 2 – на 2,7 %, для точки 3 – на 0,5 %, для точки 4 – на 3,3 %, для точки 5 – на 2,2 %, для точки 6 – на 2,3 %. Макроскопические напряжения отличаются в пределах 1,4...6,4 %.

Таблица 2

Главные напряжения и степень анизотропии для точек на рис. 1

№ точки	Для сплошной линии			Для штриховой линии		
	σ_1	σ_2	β	σ_1	σ_2	β
1	56,52	37,87	1,880	57,33	39,14	1,758
2	68,85	31,80	1,847	70,31	33,10	1,797
3	68,22	30,37	1,838	67,13	29,81	1,847
4	69,48	23,27	1,765	68,28	22,12	1,823
5	56,52	37,87	1,880	55,39	36,78	1,840
6	55,39	36,78	1,840	57,33	39,14	1,798

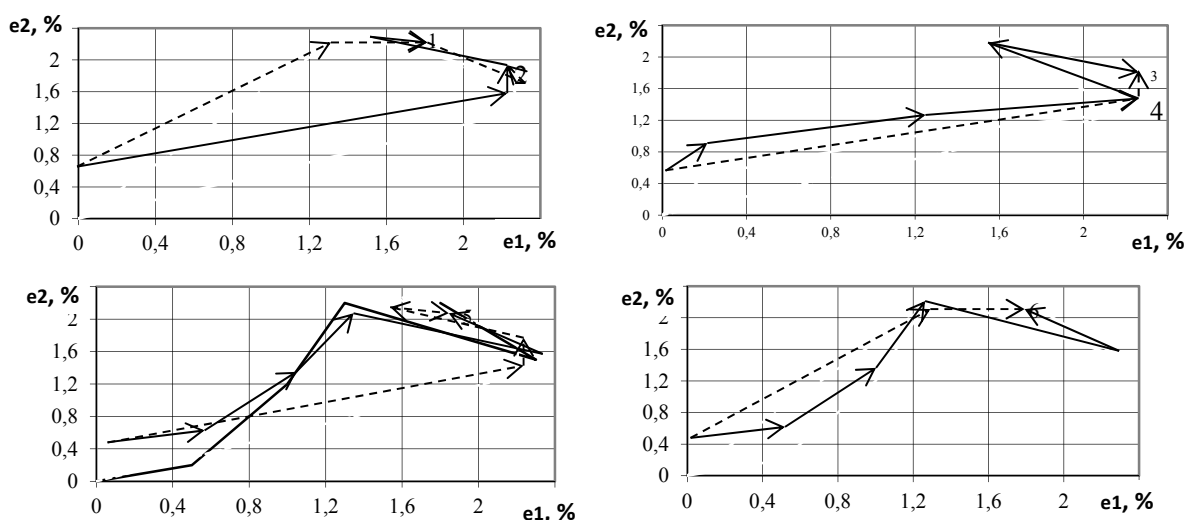


Рис. 1. Зависимость главных напряжений и упругой анизотропии волокнистого композита от траектории деформирования в фазовом пространстве главных деформаций

Величины формируемых напряжений и степени анизотропии в композите представлены числовыми значениями в табл. 2.

ВЫВОДЫ

Разработанный подход с позиций статистической микромеханики композитов позволяет описывать механическое поведение слоистых композиционных материалов при сложном непропорциональном нагружении. Расчетно-экспериментальным путем установлена точность предложенного подхода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васин Р. А. О применении СН-ЭВМ для расчета упруго-пластических оболочек при сложном нагружении / Р. А. Васин // *Методы расчета и проблемы прочности конструкций из современных материалов.* – Владивосток, 1983. – С. 82–93.
2. Васин Р. А. О применении СН-ЭВМ к задачам расчета НДС пластин и оболочек / Р. А. Васин, Н. Н. Столяров // *Прикладная механика.* – 1984. – № 8. – С. 68–73.
3. Удрис А. О. Исследование деформирования и разрушения стеклопластика со спиральным армированием 45° при простом и сложном нагружении / Э. Т. Упитис, Г. А. Тегрес // *Механика композитных материалов.* – 1984. – № 5. – С. 805–813.
4. Изучение прочности и деформируемости органопластиков при пропорциональном деформировании и сложном нагружении / Р. А. Авьякан, И. И. Даникова, О. В. Лебедева, Т. В. Соколова // *Механика композитных материалов.* – 1983. – № 5. – С. 930–933.
5. Маньковский В. А. Закономерность кратковременной и длительной прочности композитов при сложных напряженных состояниях / В. А. Маньковский // *Механика композитных материалов.* – 1983. – № 5. – С. 799–804.
6. Скачков В. А. Связанные задачи деформирования и разрушения композитных материалов и конструкций / В. А. Скачков, Ю. В. Соколкин // *Пятый Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике.* – Алма-Ата : Наука, 1981. – С. 322.
7. Скачков В. А. О связи прочности и деформационных характеристик с разрушением композитных материалов / В. А. Скачков, В. Л. Леонтьев, Ю. В. Соколкин // *Напряженно-деформированное состояние и прочность конструкций.* – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1982. – С. 56–62.
8. Богачев И. Н. Введение в статистическое металловедение / И. Н. Богачев, А. А. Вайнштейн, С. Д. Волков. – М. : Металлургия, 1972. – 216 с.

Скачков В. А. – канд. техн. наук, доц. ЗГИА.

ЗГИА – Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье.

E-mail: berolgar@ukr.net