

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ

На правах рукописи

БУГАЙ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ С МИКРОПОВРЕЖДЕНИЯМИ МАТРИЦЫ

01.02.04 – механика деформируемого
твёрдого тела

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев

AB 25.372

Работа выполнена в Институте механики АН УССР

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
Маслов Б.П.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Цибенко А.С.

- кандидат технических наук
Коноваленко В.В.

Ведущая организация - Институт сверхтвердых материалов
АН УССР

Защита состоится " 21 " сентября 1991 г. в 10:00 часов
на заседании специализированного совета Д 016.49.01 в Институте
механики АН УССР (252057, Киев-57, ул.Нестерова, 3).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института
механики АН УССР.

Автореферат разослан " 21 " августа 1991 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
доктор технических наук

И.С. Чернышенко

И.С.Чернышенко

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00815571 (R)

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН УРСР

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка и внедрение в практику новых типов композитных материалов связано с развитием теоретических моделей деформирования и разрушения неоднородных сред. Задача определения эффективных физико-механических свойств по известным свойствам компонентов является одной из главных в механике композитных материалов. Имея решение этой задачи можно исследовать напряженно-деформированное состояние в макроскопических и микроскопических элементах структуры, формулировать критерии прочности и разрабатывать рекомендации по оптимальному выбору структуры и состава материала.

Условия эксплуатации современных конструкций из композитных материалов характеризуются высокими уровнями механических нагрузок, температур, электрических и магнитных полей. Поэтому для обеспечения необходимой прочности используют высокомодульные анизотропные волокна. При нагружении материала в матрице могут развиваться микродефекты в виде хаотически ориентированных дискообразных трещин, что заметно влияет на характеристики жесткости и прочности композита. Чтобы уменьшить влияние микродефектов на характеристики прочности, особенно в поперечном направлении, часто применяют армирование дискретными волокнами в плоскости, перпендикулярной основному направлению армирования анизотропными волокнами. Указанные особенности структуры композитных материалов могут быть описаны в рамках модели, учитывавшей анизотропию волокон и наличие микроповреждений в матрице.

В механике композитных материалов условно выделяют два подхода: детерминированный и статистический. Первый основан на представлении об упорядоченной структуре неоднородной среды,

обладающей некоторой периодичностью. Второй предполагает структуру материала случайной. Как правило, это более соответствует реальным композитным материалам, при производстве которых тяжело обеспечить периодичность укладки волокон или включений.

Значительное место в исследованиях неоднородных материалов занимает работы, в которых используются статистические методы.

В теории случайных функций к наиболее распространенным методам определения эффективных постоянных композитов относятся: корреляционный, одноточечное и сингулярное приближение, метод условных моментов. Важный вклад в развитие этого направления внесли работы Болотина В.В., В.Н.Москаленко, Л.Н.Розенцвейга, А.Г.Фркина, Л.П.Хорошуна, Т.Д.Шермергора и др.

Вопросы механики разрушения и прочности композитных материалов исследованы в работах А.Н.Гузя, Г.А.Венина, Ю.М.Тарнопольского, В.П.Левитаса, Н.В.Новикова, Л.П.Хорошуна, Э.Е.Шевченко, В.В.Коноваленко, А.С.Цыбенко.

Проведенный анализ литературы показывает, что к настоящему времени недостаточно изучены материалы с микрповреждениями матрицы, в том числе композиты, армированные высокопрочными анизотропными волокнами, и композиты коугольной намотки.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма решения задачи об определении эффективных физико-механических характеристик гибридных пространственно армированных композитных материалов с поврежденной матрицей и исследование влияния, ориентации и концентрации включений на упругие и прочностные свойства композита.

Научная новизна. В работе развит метод расчета упругих постоянных композитных материалов стохастической структуры применительно к задачам прогнозирования жесткости и прочности гибри-

ных композитов с поврежденной матрицей.

Практическая ценность. Предложенная в работе методика расчета позволяет определить эффективные упругие постоянные материалов, ослабленных хаотически ориентированными трещинами, материалов косоугольной намотки и гибридных композитов пространственного армирования с микроповреждениями матрицы. Это позволяет вести целенаправленный поиск новых композитных структур, которые оптимальным образом сочетали бы в себе заданные макроскопические свойства и сравнительно простую технологию производства.

Некоторые результаты, представленные в работе, включены в отчет по теме НИР "Разработка методов расчета, проектирование и изготовление металлопластиковых баллонов высокого и среднего давления для природного скатого газа" № г.р.01.87.0011885.

Достоверность полученных результатов обеспечена применением строгого, обоснованного и апробированного метода условных статистических моментных функций, предложенного И.П.Хорошуном и использованного в его работах и работах его учеников для решения статистических задач механики композитных материалов. В ряде случаев проведено сравнение с известными результатами других авторов, а также с экспериментальными данными. Сравнение показало, что применение предложенного алгоритма расчета гарантирует получение достоверных результатов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на I Всесоюзном научно-техническом семинаре "Применение полимерных композиционных материалов в машиностроении" (Ворошилоград, 1987), I Всесоюзном симпозиуме "Механика и физика разрушения композитных материалов и конструкций" (Ужгород, 1988), УП Всесоюзной конференции по механике полимерных и композитных материалов (Рига, 1990).

Публикации. Основные результаты проведенных исследований опубликованы в пяти работах [1-5].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, описки литературы, включающего наименований, и изложена на страницах машинописного текста, включая рисунки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, проведен анализ работ по механике композитных сред регулярной и стохастической структуры. Поставлена цель работы, сформулированы основные вопросы, выносимые на защиту, дана краткая аннотация диссертационной работы.

В первой главе предложена методика расчета упругих постоянных композитов, армированных волокнами, эллипсоидальными включениями, материалов слоистой структуры, матрица которых повреждена хаотически ориентированными дискообразными трещинами.

Композит представляет собой полимерную матрицу, армированную произвольным образом ориентированными короткими волокнами в форме эллипсоидов вращения. Предполагается, что упругие свойства статистически однородны в пределах элементарного макрообъема, а характерные размеры волокон достаточно малы. Следовательно, можно использовать свойства эргодичности случайных тензорных полей упругих модулей, напряжений и деформаций.

Осредняя закон связи напряжений и деформаций

$$\sigma_{ij} = \lambda_{ijk\ell} \epsilon_{k\ell} \quad (1)$$

получаем

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \lambda_{ijk\ell}^A \sum_{n=1}^K C_{n\ell} \langle \epsilon_{k\ell}^{An} \rangle + \lambda_{ijk\ell}^M C_M \langle \epsilon_{k\ell}^M \rangle \quad (2)$$

Здесь $\overset{\Lambda}{\lambda}_{ijke}$, $\overset{M}{\lambda}_{ijke}$ - тензоры упругих постоянных включений и матрицы $\langle \overset{AN}{\epsilon}_{ke} \rangle$, $\langle \overset{M}{\epsilon}_{ke} \rangle$ - условные математические ожидания тензора деформаций

c_{AN} , c_M - концентрация включений N направления и матрицы.

При помощи функции Грина тензорное дифференциальное уравнение (1) сведем к интегральному

$$\epsilon_{ij} = \langle \epsilon_{ij} \rangle + \Gamma_{ijkl} * \lambda'_{klpq} \epsilon_{pq} \quad (3)$$

Осредняя уравнение (3) при условии, что текущая координата \mathcal{X} находится в V_{AN} - объеме, занятом включениями, ориентированными в N направлении. В результате получим

$$\langle \epsilon_{ij}^{AN} \rangle = \langle \epsilon_{ij} \rangle + \Gamma_{ijkl} * \left(\lambda'_{klpq}{}^A \sum_{j=1}^K \langle \epsilon_{pq}^{A, AN} \rangle P_{AN, A} + \lambda'_{klpq}{}^M \langle \epsilon_{pq}^{M, AN} \rangle P_{AN, M} \right) \quad (4)$$

При помощи несложных алгебраических преобразований, используя символическую форму, уравнение (4) сведем к выражению

$$\langle \epsilon^{AN} \rangle = \langle \epsilon \rangle + c_M h \lambda^R \langle \epsilon^M \rangle ; \quad (5)$$

$$h = g / (I - g \lambda^A).$$

Задаваясь явным видом условных вероятностей перехода $P_{AN, A}$, $P_{AN, M}$ получаем выражение для приведенных упругих постоянных композита, хаотически армированного эллипсоидальными включениями.

В рамках предлагаемого подхода рассмотрена предельная ситуация, когда "включениями" являются пустоты, поры. Для пористой матрицы:

$$K^* = K(1 - c_A)^2 / [1 + c_A(3K/4\mu - 1)];$$

$$\mu^* = \mu(1 - c_A)^2 / [1 - c_A(3K - 4\mu) / (9K + 8\mu)];$$

$$c_A = \omega \mathcal{X}$$

где C_A - объемная концентрация эллипсоидальных пор,

K и μ - упругие постоянные матрицы,

α - отношение продольного и поперечного размеров пор.

Устремляя один из размеров пор к нулю, переходим к модели матрицы, ослабленной хаотически ориентированными в пространстве дискообразными трещинами.

Во второй главе рассматриваются гибридные материалы пространственного армирования, т.е. композит, армированный анизотропными высокомодульными волокнами, матрица которого содержит пространственно ориентированные эллипсоидальные включения.

Метод расчета трехкомпонентных композитов включает в себя два этапа. На первом рассчитываются характеристики матрицы, пространственно армированной эллипсоидальными включениями, на втором рассматривается волокнистый композит, упругие постоянные матрицы которого получены ранее.

В третьей главе рассмотрен вопрос прогнозирования прочности гибридных композитов.

Полученные в гл.2 выражения дают возможность найти упругие постоянные композита, армированного анизотропными непрерывными волокнами и хаотически ориентированными сфероидальными включениями.

Зная эффективные модули композита, определяются средние поля напряжений и деформаций в матрице и анизотропных волокнах через макроскопические напряжения и деформации представительного объема

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon \rangle_F &= A_F \langle \varepsilon \rangle; & \langle \sigma \rangle_F &= B_F \langle \sigma \rangle; \\ \langle \varepsilon \rangle_M &= A_M \langle \varepsilon \rangle; & \langle \sigma \rangle_M &= B_M \langle \sigma \rangle; \end{aligned} \quad (6)$$

Операторы A_N , B_N связаны очевидным соотношением

$$c_F A_F + c_M A_M = c_F B_F + c_M B_M = I \quad (7)$$

Выбор оптимальной структуры материала связан с максимально возможным нагружением высокомодульных волокон. Пусть σ_{1F}^0 , σ_{3F}^0 , σ_{4F}^0 , σ_{6F}^0 - предельные значения напряжений, тогда

$$\begin{aligned} \sigma_{1F}^0 &= (k+m)_{BF} \langle \sigma_1 \rangle + (k-m)_{BF} \langle \sigma_2 \rangle + e_{BF} \langle \sigma_3 \rangle; \\ \sigma_{3F}^0 &= e_{BF}^T (\langle \sigma_1 \rangle + \langle \sigma_2 \rangle) + n_{BF} \langle \sigma_3 \rangle; \\ \sigma_{4F}^0 &= 2 p_{BF} \langle \sigma_4 \rangle; \quad \sigma_{6F}^0 = 2 m_{BF} \langle \sigma_6 \rangle \end{aligned} \quad (8)$$

Формулы (8) представляют собой систему условий прочности гибридного материала. Потеря несущей способности композита отождествляется с разрушением волокна. В практических расчетах уравнения (8) могут быть сведены в пространстве напряжений к одномерным

$$\begin{aligned} \langle \sigma_1 \rangle &= Q_1 \sigma_{1F}^0; & \langle \sigma_3 \rangle &= Q_3 \sigma_{3F}^0; \\ \langle \sigma_4 \rangle &= Q_4 \sigma_{4F}^0; & \langle \sigma_6 \rangle &= Q_6 \sigma_{6F}^0 \end{aligned} \quad (9)$$

Коэффициенты Q_j ($j = 1, 3, 4, 6$) зависят от упругих свойств анизотропных волокон, матрицы, частично ориентированных в объеме матрицы сфероидалных включений и их концентрации.

В четвертой главе изложены методы прогнозирования характеристик вязкоупругого деформирования композитных материалов косоугольной намотки. Предложена методика расчета эффективных комплексных модулей, описывающих поведение материала при гармоническом нагружении.

В заключении диссертации приведены основные научные результаты и выводы работы.

1. Сформулирована постановка и разработан алгоритм решения задач об определении эффективных упругих и прочностных постоянных гибридных пространственно армированных материалов с поврежденной матрицей.

2. Определены эффективные упругие и прочностные постоянные композитов в зависимости от физико-механических свойств исходных компонентов, концентрации и формы включений материалов, матрица которых повреждена хаотически ориентированными дискообразными трещинами.

3. Решение, полученное для композитов на основе ориентированных эллипсоидальных включений, обобщено на случай композитов с разориентированными включениями. Вычисления макроскопических постоянных таких композитов осуществляются в два этапа. На первом этапе определяются эффективные постоянные материалов, армированных ориентированными эллипсоидальными включениями, а на втором этапе проводится осреднение этих постоянных. Построен алгоритм решения задач об эффективных упругих постоянных композитов на основе включений в форме эллипсоидов вращения, имеющих произвольную ориентацию в пространстве.

Решена задача для предельной ситуации, когда "включениями" являются пустоты, поры, дискообразные трещины (продольный размер эллипсоидальной поры устремлен к нулю).

4. Разработан пакет прикладных программ, являющийся элементом системы автоматизированного проектирования (САПР) конструкций из композитных материалов (программы расчета макроскопических упругих и прочностных постоянных волокнистых, слоистых и гибридных материалов с поврежденной матрицей).

Установлено, что значения эффективных постоянных существенно зависят от поврежденности матрицы практически для всех кон-

центраций включений (за исключением $C_1 = 0,8-I$). Так, например, при $C_1 = 0,4$ для значений параметра поврежденности матрицы 1,5,10,20 значения упругих модулей уменьшаются соответственно на 7,16,28,41%.

5. Разработаны методы прогнозирования характеристик вязкоупругого деформирования композитных материалов. Предложена методика расчета эффективных комплексных модулей, описывающих поведение материала при гармоническом нагружении.

Основное содержание работы изложено в публикациях:

1. Б.П.Маслов, С.Н.Бугай Методика расчета упругих свойств полимерных конструкционных материалов с микрповреждениями матрицы. // Тр. I Всесоюзного научно-технического семинара "Применение полимерных композиционных материалов в машиностроении". Тез.докл. - Ворошиловград, 1987. - с.119-120.

2. Б.П.Маслов, С.Н.Бугай Статистические методы расчета прочности композитных материалов с поврежденной матрицей // Тр. I Всесоюзного симпозиума "Механика и физика разрушения композитных материалов и конструкций". Тез.докл. - Ужгород, 1988. - С.55.

3. Б.П.Маслов, С.Н.Бугай Упругие свойства композитов косоугольной намотки с поврежденной матрицей // Прикл.мех.- 1989, 25, № 2. - с.82-89.

4. Б.П.Маслов, А.Х.Меликбекян, С.Н.Бугай Прогнозирование прочности трехкомпонентных волокнистых композитов // Прикл.мех.- 1990, 26, № 8. - с.10-16.

5. Б.П.Маслов, С.Н.Бугай Нелинейное деформирование и прочность стохастических композитов с поврежденной матрицей и Тр. УП Всесоюзной конференции по механике полимерных и композитных материалов. Тез.докл. - Рига, 1990. - с. III.

AB 25.372
AB 25.372
84

Подписано к печати 19.07.91г.

Формат 60x84/16.

Бумага офсетная Усл.-печ.лист. 10.

Уч.-изд. лист 10.

Тираж 100. Заказ 1065. Бесплатно

ФОН Института электродинамики АН УССР,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

84