

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

Р С Ф С Р

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

АНОШКИН АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ И
НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ
ПРИ НАГРУЖЕНИИ В ПОПЕРЕЧНОЙ ПЛОСКОСТИ

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого
твёрдого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Самара, 1991

Работа выполнена в Пермском политехническом институте

Научный руководитель – доктор физико-математических наук,
профессор Ю.В.Соколкин

Научный консультант – кандидат физико-математических
наук, старший научный сотрудник
А.А.Ташкинов

Официальные оппоненты– доктор технических наук
А.Н.Полилов

– доктор физико-математических наук,
доцент Л.А.Сараев

Ведущая организация – Институт гидродинамики СО АН СССР,
г. Новосибирск

Защита диссертации состоится "18" октября 1991 г.
в 14 часов 00 минут на заседании специализированного
Совета К 063.94.01 по присуждению учёной степени кандидата
физико-математических наук при Самарском государственном
университете по адресу: 443011, г.Самара, ул. Академика
Павлова, № 1, ауд. 203.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Самарского государственного университета.

Автореферат разослан "10" сентября 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета,
кандидат физико-математических
наук

А.Ф.Федечев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время композиционные материалы (КМ) нашли достаточно широкое применение в различных отраслях науки и техники. К наиболее эффективным и распространённым композитам относятся волокнистые пластики, используемые в качестве силовых материалов в высоконагруженных конструкциях. Требования оптимального проектирования, сокращения времени и материальных затрат на экспериментальную отработку изделий определяют интерес к созданию и совершенствованию новых методов прогнозирования деформационных и прочностных свойств КМ. Одним из перспективных направлений в разработке новых моделей механики композитов является структурно-феноменологический подход, позволяющий подробно исследовать особенности взаимодействия структурных элементов КМ. Центральной проблемой при этом является прогнозирование эффективных характеристик композиционных материалов. В настоящее время наиболее исследованы вопросы определения эффективных упругих констант. В значительно меньшей степени разработаны математические модели для прогнозирования нелинейных деформационных соотношений и пределов прочности КМ.

Для однонаправленных волокнистых композитов особый интерес представляет проблема расчёта эффективных соотношений при произвольных трансверсальных нагрузках, поскольку соответствующие испытания реальных материалов являются наиболее трудоёмкими. Для решения данной проблемы существует два основных подхода: исследование моделей со случайным расположением элементов структуры, в предположении однородности полей напряжений и деформаций в них; и исследование периодических структур, позволяющих получить неоднородные поля напряжений и деформаций в компонентах. Однако очевидные отличия данных моделей от реальной структуры материала обуславливают необходимость разработки методов, учитывающих влияние случайности в расположении волокон на характер неоднородного напряжённо-деформированного состояния компонентов композита, а также его эффективные нелинейные деформационные и прочностные характеристики.

Совершенствование расчётных методик прогнозирования эффективных характеристик композитов на основе новых структурных моделей позволит ускорить процесс создания и внедрения в практику новых композиционных материалов.

Работа выполнена в соответствии с Координационным планом АН СССР по естественным наукам (проблема 02-09 "Механизм композитных

материалов") и НИР вузов в области механики на 1986-1990 гг. (разделы 2.3, 2.4, 2.5, 2.7; приказ Минвуза СССР № 455 от 19.06.85), а также по планам научно-технических работ Пермского политехнического института по теме № ГРО186.0052768 "Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций" (1986-1990гг.).

Цель работы:

- разработать алгоритмы реализации метода локального приближения для расчёта напряжённо-деформированного состояния в компонентах однонаправленных волокнистых композитов нерегулярной структуры с учётом процессов нелинейного деформирования и разрушения;
- создать комплекс программ для организации вычислительных процессов решения нелинейной стохастической задачи при произвольных видах нагружения, последующего статистического анализа и обработки результатов расчётов в соответствии с разработанным алгоритмом;
- исследовать влияние нерегулярности расположения элементов структуры на характер НДС, зарождение и развитие зон нелинейного деформирования и разрушения в компонентах, а также на эффективные деформационные соотношения и прочностные характеристики однонаправленных волокнистых пластиков при различных видах нагружения в поперечной плоскости.

Научная новизна:

- разработана модель нелинейного деформирования и разрушения однонаправленного волокнистого композита с нерегулярным расположением волокон при произвольно заданном поперечном нагружении с учётом неоднородного характера полей напряжений и деформаций в компонентах КМ;
- разработан и реализован на ЭВМ программный комплекс, осуществляющий решение нелинейной стохастической задачи микромеханики для однонаправленных волокнистых композитов методом локального приближения с учётом неупругого деформирования и разрушения элементов структуры;
- проведена оценка влияния разупорядоченности волокон на эффективные деформационные характеристики и поля напряжений в компонентах волокнистых пластиков при поперечных нагрузках;
- показаны возможные процессы развития областей нелинейного деформирования и разрушения в структурных элементах регулярной и нерегулярной моделей КМ;
- построены нелинейные диаграммы деформирования и макроскопические поверхности прочности однонаправленных стекло- и органопла-

стиков при различных траекториях простого трансверсального нагружения, проведена их аппроксимация с использованием соотношений нелинейной теории упругости и критериев прочности анизотропных сред.

Практическое значение: Разработанный метод расчёта НДС, определения областей разрушения в элементах структуры и прогнозирования деформационных и прочностных свойств однонаправленных волоконистых композитов, реализованный в качестве программного комплекса для ЭВМ, может быть использован в практике научно-исследовательских организаций и конструкторских бюро, связанных с внедрением и разработкой новых композиционных материалов и конструкций из них. Практическое значение представляют оценки деформационных и прочностных свойств в поперечной плоскости однонаправленных стекло- и органопластиков. Результаты настоящей работы внедрены в НПО "Искра", где они использовались при исследовании напряжённо-деформированного состояния, механизмов разрушения и прогнозирования прочности двухслойных раструбов конструкций ракетно-космической техники.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на II Летней школе по механике деформируемого твёрдого тела (Куйбышев, 1989); Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение качества и надёжности продукции, программного обеспечения ЭВМ и технических средств обучения" (Куйбышев, 1989); VII Всесоюзной конференции по механике полимерных и композитных материалов (Рига, 1990); Всесоюзной конференции "Проблемы прочности и технологичности конструкций из композиционных материалов" (Севастополь, 1990); Всесоюзной конференции "Применение статистических методов в производстве и управлении" (Пермь, 1990); XII Всесоюзной конференции по численным методам решения задач теории упругости и пластичности (Тверь, 1991); научном семинаре ВНТО судостроительной промышленности им. А.Н. Крылова "Механика и технология полимерных и композиционных материалов и конструкций" (руководитель - доктор технических наук, профессор Томашевский В.Т., 1990); научном семинаре кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского политехнического института (руководитель - доктор физико-математических наук, профессор Соколкин Ю.В., 1989-1991); научном семинаре кафедры механики деформируемого твёрдого тела Самарского государственного университета (руководитель - доктор физико-математических наук, профессор Астафьев В.И., 1991).

Достоверность результатов основывается на использовании апробированных методов механики деформируемого твердого тела, механики

композиционных материалов, а также подтверждается путём сопоставления с известными теоретическими и экспериментальными исследованиями других авторов.

Публикации. Содержание диссертации отражено в пяти опубликованных работах.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы, занимающих в общей сложности 169 страниц машинописного текста. Работа содержит 33 рисунка и 13 таблиц, расположенных в тексте по месту ссылок. Список литературы включает 143 наименования. Основной текст диссертации занимает 107 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава является вводной. В ней приведён краткий литературный обзор, отражающий современное состояние вопросов исследования. Сформулированы цели данной работы и полученные в ней новые научные результаты.

Во второй главе представлена структурно-феноменологическая модель нелинейного деформирования и разрушения однонаправленного волокнистого композита (ОВКМ). Рассматривается два варианта расположения волокон в поперечной плоскости: периодическое, в узлах квадратной решётки, (регулярная структура) и случайное (стохастическая структура). В последнем случае стохастическая структура получается из исходной тетрагональной путём случайного смещения центров волокон при условии непересечения границ ячеек периодичности или обеспечения заданной гарантированной прослойки между волокнами. Записана система уравнений для эффективной однородной анизотропной среды, соответствующая макроскопическому деформированию и разрушению ОВКМ. Поставлена задача: на основе исследования процессов структурного деформирования и разрушения определить вид и вычислить параметры эффективных материальных функций, а также установить пределы прочности ОВКМ при произвольно заданных траекториях нагружения в поперечной плоскости. Рассмотрены различные варианты определяющих соотношений нелинейного деформирования и феноменологические критерии прочности анизотропных сред. Отмечено, что для матрицы будут использоваться соотношения теории малых упруго-пластических деформаций, а для описания нелинейного поведения ОВКМ на макроскопическом уровне выбраны соотношения нелинейной анизо-

тропной теории упругости. В качестве критериев прочности как на макроскопическом, так и на структурном уровнях выбраны тензорно-полиномиальный и критерий, полученный разложением функции прочности на сфере с помощью тензоров. Нелинейная стохастическая задача микромеханики о плоской деформации ОВКМ при произвольном трансверсальном нагружении решается с помощью метода локального приближения. Метод основан на принципе локальности, согласно которому в расположении и взаимодействии структурных элементов имеет место ближний порядок. Это позволяет моделировать НДС в окрестности некоторого структурного элемента (волокна) на фрагменте композита, содержащем малое число структурных элементов. Для материалов с тетрагональной структурой достаточно рассмотреть краевую задачу для одного фрагмента, содержащего девять ячеек периодичности: одну в центре и восемь окружающих по бокам. При исследовании стохастической модели решение предложено искать в реализациях, рассматривая краевые задачи для выборки заранее заданной совокупности аналогичных фрагментов разупорядоченной структуры композита. В центре каждого фрагмента выделяется центральная стохастическая ячейка, получаемая пересечением перпендикуляров к серединам отрезков, соединяющих центры включений. Напряжения на границе фрагмента подбираются таким образом, чтобы напряжения, осредненные по центральной стохастической ячейке, равнялись заданным макроскопическим. Приведена система уравнений, отвечающая краевой задаче о плоской деформации фрагмента структуры при произвольных траекториях простого макронагружения в поперечной плоскости. Предложена двухстадийная схема моделирования процессов разрушения в компонентах композита, связанная с оценкой знака первого инварианта тензора напряжений $I_e^{(1)}$: разрушение с полной потерей несущей способности в области $I_e^{(1)} \geq 0$ и разрушение с сохранением способности воспринимать только гидростатическую сжимающую нагрузку в области $I_e^{(1)} < 0$. Краевая задача для каждого фрагмента решается численно с помощью МКЭ.

Третья глава посвящена алгоритмам реализации метода локального приближения для решения нелинейной стохастической задачи микромеханики и разработанному программному комплексу. Рассмотрены особенности использования МКЭ в решении краевой задачи для фрагмента разупорядоченной структуры. Представлена схема триангуляции произвольного фрагмента, осуществляемой в автоматическом режиме на основе алгоритма сжатия текущей границы сетки. В качестве наиболее экономичного метода решения системы линейных уравнений выбран метод Холец-

кого. Матрица жёсткости хранилась в профильном формате. Минимизация профиля осуществлялась с помощью алгоритма переenumerации узлов вдоль координатной линии. Применение указанных алгоритмов позволило при решении краевых задач на ЭВМ ЕС-1061 использовать конечно-элементную сетку содержащую порядка 800 узлов и 1600 элементов; размер профиля матрицы жёсткости порядка 100000 машинных слов. Для решения нелинейных краевых задач с учётом образования и развития областей разрушения разработано несколько итерационных процедур, основанных на методах начальных деформаций и напряжений. Наиболее экономичная из них, используемая в последующих расчётах, позволяет получить решение нелинейной краевой задачи для одной траектории нагружения отдельного фрагмента структуры за 1-4 минуты процессорного времени (решение упругой задачи занимает порядка 45 секунд). Результаты решения краевых задач для каждого фрагмента структуры записывались во внешнюю память и после завершения серии расчётов для выборки фрагментов подвергались совместной статистической обработке.

Для получения нелинейных макроскопических определяющих соотношений и функций прочности разработан алгоритм осреднения и обработки траекторий деформирования различных случайных фрагментов структуры. Неизвестные коэффициенты указанных соотношений рассчитывались по данным вычислительных экспериментов с помощью метода наименьших квадратов. Представлена блок-схема разработанного программного комплекса. Приведены результаты проверки комплекса на тестовых задачах для ОБКМ с тетрагональной структурой. Рассчитанные эффективные упругие характеристики, межфазные напряжения при различных жёсткостях и объёмных долях волокон, а также траектория нелинейного деформирования эпоксидоропластика отличались от известных литературных данных не более чем на 5%. Сделан вывод о работоспособности составленного программного комплекса.

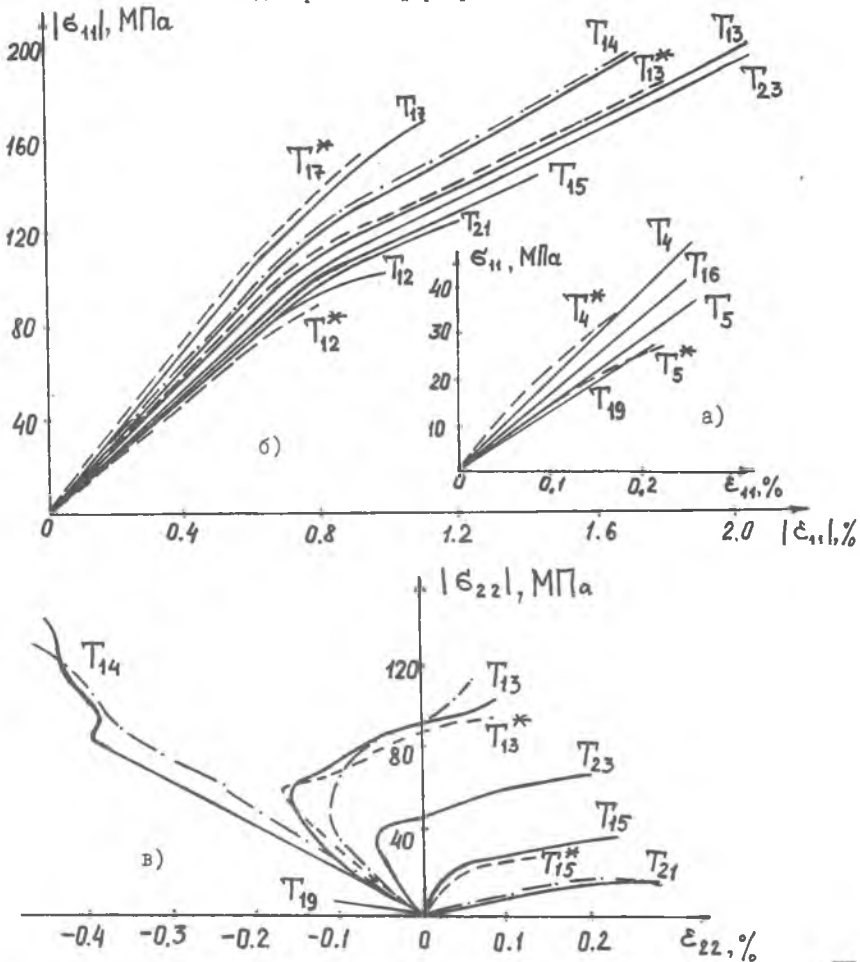
В четвёртой главе приведены результаты анализа и сравнения литературных данных по деформационным и прочностным свойствам эпоксидных матриц, выбраны характеристики, используемые в последующих расчётах. Решена в реализациях упругая стохастическая задача микромеханики для трёх типов однонаправленных эпоксидных пластиков с изотропными волокнами различной жёсткости, объёмным наполнением

$\nu_d = 0,6$. Условия макронагружения соответствовали в одном случае одноосному трансверсальному растяжению, в другом - чистому сдвигу в поперечной плоскости.

Рассчитаны эффективные упругие постоянные, статистические характеристики и коэффициенты концентрации полей микронапряжений. Проведено сравнение соответствующих параметров для регулярной и стохастической структур, показавшее незначительное (до 6%) отличие эффективных упругих характеристик и средних значений компонент тензора микронапряжений и существенное, достигающее двух-трёхкратного значения, различие коэффициентов концентраций. Построены гистограммы распределения компонент тензора напряжений, интенсивности напряжений и гидростатического давления в матрице и волокнах, а также значений функции прочности и максимальных величин исследуемых параметров в матрице по стохастическим ячейкам. С помощью дополнительной координатной сетки, накладываемой последовательно на случайные фрагменты, построены нормированные корреляционные функции, характеризующие взаимозависимость поля микронапряжений в различных точках стохастической ячейки. Установлено, что все функции являются затухающими, имеют, как правило, периодическую составляющую и область отрицательных значений.

Для регулярной и стохастической моделей однонаправленного эпоксидного стеклопластика ($\nu_f = 0,58$) решена нелинейная задача микро-механики. Для регулярной модели исследовалось двадцать семь траекторий простого трансверсального нагружения, для стохастической — десять. Построены диаграммы нелинейного деформирования и определены пределы прочности. В качестве примера на рис. I показаны диаграммы деформирования для ряда траекторий T_i . Диаграммы отвечающие растягивающим нагрузкам, а также в комбинации со сдвигом и сжатием (рис. I, а) практически линейны (отклонение от линейной зависимости не более 5%). Существенная нелинейность (до 45%) диаграмм проявляется при одноосных, двухосных сжимающих нагрузках и в комбинации их со сдвигом. Причём за счёт нелинейного деформирования матрицы отклонение от линейной зависимости достигает только 15%, более значительная нелинейность или излом диаграмм (рис. I, в) обуславливается возникновением зон разрушения в матрице композита. Их развитие отражалось на вычислительных фактограммах, анализ которых позволил выделить основные механизмы разрушения стеклопластика при поперечных нагрузках: лавинообразное распространение зоны полного разрушения ($I_g \geq 0$) вдоль сторон центральной ячейки либо по межфазной поверхности при достижении в некоторой точке матрицы критической нагрузки (характерно для траекторий растяжения и сдвига); и посте-

Диаграммы деформирования стеклопластика



Вектора начальной макронагрузки $\{\epsilon_{11}^0, \epsilon_{22}^0, \epsilon_{33}^0\}$ для траекторий T_i в МПа: $T_4 - \{5, 5, 0\}$, $T_5 - \{5, 0, 0\}$, $T_{13} - \{-20, 0, 0\}$, $T_{13}^* - \{-40, -20, 0\}$, $T_{14} - \{-40, -30, 0\}$, $T_{12} - \{-40, -10, 0\}$, $T_{16} - \{5, 2.5, 0\}$, $T_{17} - \{-40, -40, 0\}$, $T_{15} - \{10, 2.5, 1.25\}$, $T_{21} - \{-40, -5, 0\}$, $T_{23} - \{-40, -15, 0\}$.

Сплошная линия - регулярная структура, штриховая линия - стохастическая структура, штрихпунктирная линия - аппроксимация соотношениями нелинейной анизотропной теории упругости; звездочкой отмечены траектории для стохастической структуры.

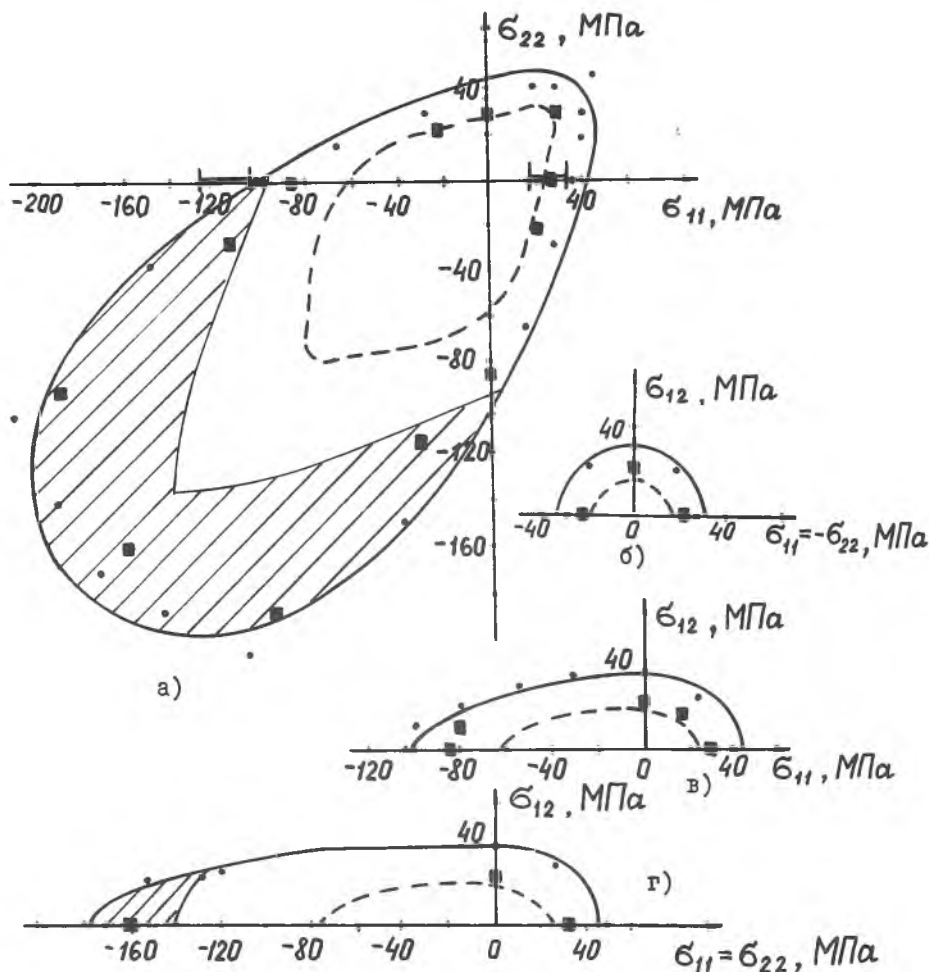
Рис. 1

пенное накопление областей частичного разрушения ($I_6^{(1)} < 0$) матрицы, воспринимающих только нагрузку гидростатического сжатия (характерно для траекторий двухосного сжатия). В последнем случае процесс нагружения может также закончиться появлением и лавинообразным развитием области полного разрушения, а может продолжаться до появления вокруг волокна либо вдоль границ центральной ячейки сплошной области частично разрушенного материала. Сравнение результатов расчётов для регулярной и стохастической моделей показало, что в целом схемы разрушения для аналогичных траекторий носят одинаковый характер, хотя для различных случайных фрагментов конфигурации областей разрушения могут отличаться. Диаграммы деформирования для рассматриваемых моделей, как правило, совпадают с точностью до 7%, за исключением завершающего участка, где нелинейность некоторых диаграмм, полученных для стохастической модели, проявляется в большей степени. Это связано с тем, что в стохастической структуре макроскопическому разрушению всегда предшествует процесс накопления разрушенных областей или структурных фрагментов. Пределы прочности для стохастической модели несколько меньше: приблизительно на 20% для растягивающих нагрузок и на 6–15% для сжимающих.

Расчётные точки предельной нагрузки, аппроксимируемые полиномиальным критерием третьей степени показаны на рис. 2. Сравнение с экспериментальными данными позволяет сказать, что прочность на растяжение рассчитывается достаточно точно, с погрешностью $\sim 5\%$, а прогнозируемая прочность на сжатие соответствует нижней границе диапазона экспериментальных данных.

Исследование органопластика, $\nu_z = 0,72$, проводилось на регулярной модели. Получены траектории деформирования и значения предельных макронагрузок для тридцати пяти траекторий простого трансверсального нагружения, основные особенности диаграмм деформирования аналогичны указанным для стеклопластика. Прочность данного материала определяется в большинстве случаев нагружения прочностью волокна. Разрушение, как правило, носит лавинообразный характер, при этом волокно или матрица могут разрушаться с полной потерей несущей способности либо продолжая воспринимать только всестороннюю сжимающую нагрузку. В некоторых случаях, при двухосном сжатии, а также сжатии со сдвигом, возможны и различные равновесные процессы накопления разрушенных зон в матрице и волокне. Механизмы разрушения при различных траекториях нагружения анализировались с помощью вычислительных фрактограмм.

Поверхность прочности однонаправленного стеклопластика
при нагружении в поперечной плоскости



• — расчётные точки для регулярной модели; ■ — расчётные точки для стохастической модели; — — диапазон экспериментальных значений. Сплошная линия — аппроксимирующая поверхность тензорно-полиномиального критерия третьей степени; штриховая линия — поверхность начала микроразрушений в композите стохастической структуры. Заштрихованная область соответствует нагрузкам, вызывающим разрушения в матрице композита периодической структуры.

Рис.2

Рассчитанные диаграммы деформирования стекло- и органопластика описывались соотношениями нелинейной анизотропной теории упругости. Коэффициенты вычислялись по методу наименьших квадратов, суммарная погрешность аппроксимации отдельных диаграмм не превышала 9%, в качестве примера на рис. I показан характер аппроксимации нескольких диаграмм деформирования стеклопластика.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан обобщённый вариант метода локального приближения для решения стохастических нелинейных задач микромеханики для однонаправленных волокнистых композитов, подверженных произвольному нагружению в поперечной плоскости.

2. Создан программный комплекс для ЭВМ ЕС-1061 на языке ФОРТРАН, реализующий расчёт напряжённо-деформированного состояния в компонентах однонаправленных композитов со случайным расположением волокон в поперечной плоскости с учётом физически нелинейного деформирования и разрушения структурных элементов. Комплекс включает также программы статистической обработки результатов расчёта НДС и вычисления макроскопических деформационных и прочностных характеристик КМ.

3. Проведена оценка влияния разупорядоченности расположения волокон в поперечной плоскости однонаправленных волокнистых пластиков на эффективные деформационные характеристики и параметры напряжённого состояния в компонентах КМ при трансверсальном нагружении.

4. Исследованы процессы развития областей нелинейного деформирования и разрушения в матрице и волокнах однонаправленных эпоксидных стекло- и органопластиков регулярной и нерегулярной структуры при различных простых траекториях трансверсального нагружения.

5. Рассчитаны соответствующие нелинейные диаграммы деформирования и макроскопические поверхности прочности. Проведена их аппроксимация с использованием соотношений нелинейной теории упругости и критериев прочности анизотропных сред.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Аношкин А.Н., Паньков А.А. Статистическое моделирование и оценка прочности квазипериодических композитов // Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Повышение качества и надёжности продукции, программного обеспечения ЭВМ и технических средств обучения" - Куйбышев, 1989 - С. II-12.

2. Аношкин А.Н., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Поля микронапряжений и механические свойства разупорядоченных волокнистых композитов // Механика композит. материалов. - 1990. - №5 - С. 860-865.

3. Аношкин А.Н. Алгоритм решения стохастических задач микро-механики в реализациях // Надёжность и неупругое деформирование конструкций. - Куйбышев, 1990. - С.123-128.

4. Аношкин А.Н. Корреляционные функции неоднородных полей микронапряжений квазипериодических композитов // Тезисы докладов - Всесоюзной конференции "Применение статистических методов в производстве и управлении". Т.1. - Пермь, 1990. - С.114.

5. Соколкин Ю.В., Аношкин А.Н. Поперечная прочность полимерных композитов при сложном напряжённом состоянии // Тезисы докладов - Всесоюзной конференции "Проблемы прочности и технологичности конструкций из композиционных материалов" - Севастополь, 1990. - С.18.

Сдано в печать 19.08.91.

Формат 60x84/16. Объем 1 п.л.

Тираж 100. Заказ 1357. Бесплатно.

Ротапринт Пермского политехнического института