

УДК 62.04
0195

На правах рукописи

САПОЖНИКОВ Сергей Борисович

АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
И ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ АРМИРОВАННЫХ ТКАНЬЮ ПЛАСТИКОВ
ПРИ МОНОТОННОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ

01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела

01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Челябинск - 1997

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Научный консультант -
доктор технических наук, профессор Чернявский О.Ф.

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук Жилкин В.А.

профессор, доктор технических наук Парцевский В.В.

профессор, доктор технических наук Шефер Л.А.

Ведущая организация:

Государственный ракетный центр "КБ им. академика В.П.Макеева".

Защита состоится "19" марта 1997 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д О53.13.01 при Челябинском государственном техническом университете: 454080, г.Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧГТУ.

Ваш отзыв в двух экземплярах, скрепленный печатью, просим направлять по адресу: 454080, г.Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЧГТУ, Ученый Совет.
Тел. (351-2) 39-91-23.

Автореферат разослан "18" февраля 1997 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

В.М. Конопов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прогресс техники и технологии связан в настоящее время с использованием материалов с заданными свойствами, в частности, волокнистых композитов типа армированных тканью пластиков (АТП), обуславливающих существенный экономический эффект благодаря уникальному сочетанию высокой прочности, жесткости, трещиностойкости, технологичности и малой плотности.

Стремление к максимально полному использованию преимуществ дорогостоящих композитов требует допустить неупругую работу наиболее нагруженных слоев в составе многослойного пакета как при однократном, так и при циклическом нагружениях, что требует изучения особенностей деформирования композитов при высоких уровнях напряжений, микромеханических основ их разрушения, построения уточненных математических моделей материалов и конструкций с концентраторами напряжений. Актуальность темы усиливается тем, что для крупногабаритных ответственных конструкций, например, авиационной техники, при наличии *случайных концентраторов напряжений* (пробоин, вмятин, трещин), способных резко снизить их прочность, стоимость этапа доводки в процессе серийной эксплуатации чрезвычайно высока.

Развитие математических моделей деформирования и разрушения композитов типа армированных пластиков прошло несколько ступеней постепенного уточнения (1965...1980...1990) - от упругой модели с мгновенным разрушением к описанию упругопластического склерономного и реоиномного деформирования и постепенного накопления микроповреждений в элементах их структуры.

Значительный вклад в построение моделей материалов и конструкций из композитов дляоценки прочности в условиях однородного и неоднородного напряженных состояний (с концентраторами и дефектами различной природы) при различных видах нагружения внесены известными отечественными и зарубежными учеными: Алфутовым Н.А., Амбарцумяном С.А., Ашкенази Е.К., Болотиным В.В., Булавсом Ф.Я., Ваниным Г.А., Васильевым В.В., Гузем А.Н., Гольденблатом И.И., Гуняевым Г.М., Жигуном И.Г., Зайцевым Г.П., Колтуновым М.А., Копновым В.А., Ломакиным В.А., Махутовым Н.А., Милейко С.Т., Новичковым Ю.Н., Новожиловым В.В., Образцовым И.Ф., Олдыревым П.П., Парцевским В.В., Первушином Ю.С., Победреем Б.Е., Протасовым В.В., Работновым Ю.Н., Рабиновичем А.С., Сироткиным О.С., Скудрой А.М., Соковниным Ю.П., Ставровым В.П., Суворовой Ю.С., Тарнопольским Ю.М., Уржумцевым Ю.С., Черепановым Г.П., Шефером Л.А., Фудзии Т., Бажантом З., Кристенсен-

ном С.В., Оузном Р.Дж., Розеном Б.В., Си Дж.С., Нием Т.С., Ву Э.М., Уитни М.Е. и многими другими.

Интенсивное развитие вычислительной техники (**повышение производительности, сокращение времени расчетов**) позволяет использовать более точные и, соответственно, более сложные модели нелинейного **поведения материалов** и конструкций, т.е. перейти от упрощенных моделей с **одним-двумя свободными параметрами** к численным моделям, позволяющим **прогнозировать всю кинетику деформирования и разрушения конструкций**.

Очевидно, что в таких условиях лишь *сочетание корректных экспериментальных данных о свойствах АТП, уточненных математических моделей, учитывающих все основные (для заданных условий работы) особенности нелинейного механического поведения, и совершенных методов анализа напряженного состояния конструкций и условий их разрушения* сможет ускорить процесс выбора рациональных параметров материала, экономить средства на разработке и доводке конструкций за счет автоматизации трудоемких экспериментов и расчетов, обосновать снижение чрезмерных коэффициентов запаса.

Иными словами, на этапе проектирования конструкций необходимо иметь возможность *расчетным образом* достаточно адекватно оценить прочность элементов конструкций с концентратором заданных размеров и формы.

Важно также отметить, что, например, в практике эксплуатации авиационных конструкций периоды сравнительно постоянных нагрузок сочетаются с действием переменных напряжений или вибраций, что требует учета в расчетах возможности выделения тепла (саморазогрева). Это осуществимо, очевидно, лишь при наличии соответствующих реологических моделей и расчетов баланса выделенного и рассеянного тепла.

Вышеизложенные положения определили общую цель работы: создать комплекс расчетных моделей, описывающих кинетику деформирования и микроразрушения монослоев из АТП, и методы оценки нагрузок потери устойчивости неупругого деформирования (разрушения) многослойных пластин с концентраторами напряжений.

Общая цель достигается решением следующих задач:

- ⇒ разработать уточненные способы и технику испытаний современных АТП при растяжении, сжатии и сдвиге с определением модулей упругости слоев, их пределов прочности и других характеристик;
- ⇒ создать математические модели и соответствующие ЭВМ-программы для анализа кинетики деформирования и микроразрушения монослоев склерономных и реономных тканых композитов однородной и гибридной структуры с учетом всех основных нелинейных эффектов механического поведения;

- ⇒ разработать систему методов численного исследования кинетики деформирования и разрушения элементов конструкций с концентраторами типа вырезов и трещин при однократном нагружении, отличающихся оперативностью (для целей оптимального проектирования) и точностью (для проведения проверочных расчетов);
- ⇒ изучить особенности возникновения и идентификации дефектов в условиях эксплуатации конструкций из АТП, разработать математические модели образования таких дефектов, способы их замены на эквивалентные концентраторы.

Экспериментальные и расчетные исследования проведены на кафедре "Прикладная механика, динамика и прочность машин" Челябинского государственного технического университета (лаборатория механики композитов), в Государственном ракетном центре "КБ им. акад. В.П.Макеева" (г.Миасс), в Авиационном научно-техническом комплексе (АНТК) им. акад. А.Н. Туполева (г.Москва), в АО "Уралэлектродин" (г.Челябинск), в АО "Урал-Москва" (г.Златоуст), в фирме "NEVE'S UNIFORMS, Inc." (г. Денвер, США).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. на базе МКЭ в двумерной постановке разработаны численные методы приближенного и уточненного расчета предельных (разрушающих), в смысле потери устойчивости нелинейного деформирования, нагрузок тонкостенных элементов конструкций из многослойных АТП с произвольными сквозными вырезами. При дискретизации исследуемых областей предложены аналитические зависимости для вычисления размеров конечных элементов (КЭ) с использованием ключевых понятий о представительной выборке элементов микроструктуры монослоев и об осреднении напряжений на базе КЭ;
2. созданы оригинальные структурные реологические модели деформирования и разрушения монослоев АТП, в которых количество эмпирически определяемых констант минимизировано за счет учета механики взаимодействия элементов структуры материала (способа переплетения нитей основы и утка, соотношения числа основных и уточных нитей на единицу длины и др.);
3. выявлены зависимости характеристик напряженного состояния образцов для испытаний композитов от геометрических факторов и параметров анизотропии материала, что позволило разработать рациональные формы и соотношения размеров образцов при испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг, обеспечивающих определение механических свойств с заданной точностью и уменьшенный расход материала; предложены гибридные образцы для полу-

чения информации о восходящих и спадающих ветвях диаграмм кинематического нагружения монослоев АТП;

4. разработан способ приближенного решения связанной задачи термовязкоупругости и разрушения АТП при циклическом изменении напряжений, позволивший впервые получить расчетным путем нижнюю оценку долговечности тонкостенных вибронагруженых конструкций;
5. разработан новый метод выявления повреждений слоистого композита (тонкостенные обшивки трехслойных панелей с сотовым заполнителем) при эксплуатационных ударных воздействиях на основе методов голографической интерферометрии и теневого муара;
6. предложены модели для прогнозирования размеров вмятин в многослойных тканевых композитах при низкоскоростном квазистатическом (обшивки трехслойных панелей) и баллистическом (тканевые бронепанели средств индивидуальной защиты) нагружениях индентором со сферическим основанием.

Достоверность полученных результатов обосновывается:

- применением апробированных экспериментальных и численных методов анализа напряженного состояния образцов и элементов композитных конструкций (тензометрия, методы муаровых полос, фотоупругости и голографической интерферометрии, конечных элементов - вариант метода переменных параметров упругости при решении нелинейных задач с повышенной устойчивостью счета при использовании секущих, а не касательных модулей, метод итераций с завершением расчетов по достижении заданной погрешности вычислений);
- значительным объемом экспериментальных данных по испытаниям образцов из стекло-, угле-, органопластиков с тканевым армированием и гибридов различной структуры;
- сопоставлением теоретических данных, полученных автором, с экспериментальными и расчетными результатами других исследователей, опубликованными в литературе.

Основное практическое значение результатов работы состоит в следующем:

- применение ЭВМ-программ для расчетной оценки нагрузок разрушения элементов конструкций из АТП с концентраторами напряжений и трещиноподобными дефектами позволяет существенно сократить объем испытаний надрезанных образцов для оценки вязкости разрушения однородных и гибридных композитов при проектировании изделий авиационной и ракетно-

космической техники (использовано в АНТК им. акад. А.Н.Туполева и в Государственном ракетном центре "КБ им. акад. В.П.Макеева");

- математические модели реономных АТП и результаты соответствующих испытаний образцов позволяют обоснованно подойти к назначению коэффициентов запаса прочности, что продемонстрировано, в частности, для силовых панелей закрылков самолета Ту-204 и стабилизатора ТУ-160, которые испытывают интенсивное акустическое воздействие при взлете и посадке (использовано в АНТК им. акад. А.Н.Туполева);
- математические модели тонкостенных многослойных АТП при действии локального удара индентором со сферическим основанием использованы при проектировании ударопрочных обшивок трехслойных панелей с сотовым заполнителем (АНТК им. акад. А.Н.Туполева) и средств индивидуальной защиты (бронежилетов) от пуль стрелкового оружия (использовано в АО "Урал-Москва", г.Златоуст, АО "ФОРТ Технолоджн", г.Москва, ООО предприятие "Уралспецпроект", г.Челябинск).
- выявленные расчетным путем возможности значительного нелинейного деформирования угле- и стеклопластиков, и гибридов на их основе использованы при разработке комбинированных металлопластиковых корпусов гидроцилиндров минимальной массы для гидроприводов авиационного назначения (использовано в ПМЗ "Восход", г.Павловово-на-Оке);
- выработаны конкретные рекомендации по выбору формы, размеров, способа изготовления и нагружения образцов для механических испытаний композитов с целью получения корректных данных об упругих и прочностных характеристиках монослоев при минимальном расходе материалов (использовано в АНТК им. акад. А.Н.Туполева и в Государственном ракетном центре "КБ им. акад. В.П.Макеева");
- результаты работы включены в ряд разделов курса "Механика композитных материалов", читаемым автором в ЧГТУ.

Настоящая работа является составной частью раздела 1.10.2.12 "Термо-вязкоупругость, механика композиционных материалов" Координационного плана НИР Минвуза и АН СССР по проблеме "Механика деформируемого твердого тела"(1.10.2) на 1986-90гг. (соисполнители МАИ, МАТИ и ЧПИ), а также работы по гранту Минобразования РФ по теме "Разработка методов снижения нагрузок в подвижных частях нефтедобывающего оборудования" на 1996-97 гг. (соисполнители МГТУ им. Н.Э. Баумана и ЧГТУ). Научным руководителем ЧПИ по указанному разделу был автор данной работы.

Апробация работы. Основные результаты доложены и обсуждены на 2-м Всесоюзном симпозиуме по механике конструкций из композитных материалов (Новосибирск, 1982г.), 2-й Международной конференции по гидродинамике судна (Болгария, г.Варна, 1985г.), 2-й Межреспубликанской научно-технической конференции "Совершенствование средств и методов расчета изделий машиностроения" (Волгоград, 1990г.), 4-й Международной конференции по компьютерным методам в теории пластичности (Испания, г.Барселона, 1995г.), 9-й Международной конференции по механике композитных материалов (Латвия, г. Рига, 1995), на научной сессии Челябинского Научного Центра Уральского отделения РАН (апрель 1995г.), на конференции "Расчетные методы механики деформируемого твердого тела" (г. Новосибирск, сентябрь 1995г.), в Международном институте образования (США, г. Денвер, октябрь 1995 г.), на ежегодных научно-технических конференциях Челябинского государственного технического университета (1975 ... 1996гг.) секция "Динамика и прочность машин", на XV Международной конференции "Математические модели, методы потенциала и конечных элементов в механике деформируемых тел" (Санкт-Петербург, июнь 1996), а также на ряде семинаров и совещаний промышленных предприятий.

Полностью работа была доложена и положительно оценена на семинарах по механике конструкций из композитов в ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского под руководством д.т.н. Г.И.Нестеренко (Москва, 1995 г.), в ГРЦ им. акад. В.П.Макеева (Миасс, 1995г), в МГТУ им. Н.Э.Баумана под руководством д.т.н., профессора Н.А. Алфутова (Москва, 1996 г.), на объединенном заседании Научного Совета по проблемам машиностроения Челябинского научного центра УрО РАН и научного семинара кафедры "Прикладная механика, динамика и прочность машин" факультета прикладной математики и физики Челябинского государственного технического университета (январь 1997 г.).

Автор защищает

Теоретические разработки:

1. Метод расчетной оценки нагрузки разрушения при кратковременном монотонном нагружении элементов тонкостенных конструкций из АТП, основанный на численном (МКЭ) моделировании процессов деформирования и микроповреждения монослоев в составе слоистого композита со сквозным макро-дефектом (вырезом, отверстием, трещиной) по известным стандартным механическим свойствам монослоев (при растяжении, сжатии и сдвиге). способе укладки монослоев в слоистом пакете и по двум микроструктурным параметрам монослоев (среднему диаметру волокон и их объемной доле).

2. Способ определения минимальных размеров конечных элементов (включение представительной выборки элементов микроструктуры АТП в конечные элементы при компьютерном анализе конструкционной прочности тонколистовых материалов).
3. Критерий для расчетной экспресс-оценки нагрузки разрушения элемента конструкции из слоистого АТП с вырезом или трещиной, позволяющий оперативно выбрать материал с заданным уровнем конструкционной прочности (вязкости разрушения) без испытаний надрезанных образцов - дать консервативную оценку вязкости разрушения.
4. Малопараметрические математические модели, описывающие деформирование и разрушение слоистого АТП при монотонном возрастании нагрузок.
5. Приближенный метод расчета оценки нагрузки разрушения элементов конструкций из АТП при циклическом повторении нагрузок с учетом термовязкоупругой связности.
6. Приближенные методы расчета размеров дефектов - вмятин - при локальном низкоскоростном ударном нагружении тонких композитных обшивок трехслойных панелей и при баллистическом нагружении многослойных тканевых бронепанелей при ударе пулей.

Экспериментальные разработки:

1. Расчетно-экспериментальную методику определения упругих характеристик монослоев АТП по результатам испытаний на растяжение образцов-полосок из слоистых материалов с фиксированной косоперекрестной укладкой.
2. Конфигурацию и способы изготовления образцов для механических испытаний композитов на растяжение, сжатие и сдвиг, обеспечивающие получение наиболее корректных данных об их упругих и прочностных свойствах.
3. Методы выявления и экспериментального исследования скрытых дефектов в слоистых пластиках, основанные на использовании голографической интерферометрии и теневого муара.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в монографии и более чем в 50 статьях, материалах конференций, заявках на авторские свидетельства и патенты.

СТРУКТУРА И ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Она изложена на 279 страницах, включая 81 рисунок, 9 таблиц, 250 нанменований литературных источников, приложе-

ния с программами для ЭВМ, фактическими материалами (протоколы испытаний, таблицы) и документами об использовании результатов работы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены основные цели, методы, отмечена научная новизна, практическая ценность, сформулированы положения, выносимые на защиту; в первой главе приведен аналитический обзор литературы по задачам данного исследования, во второй и третьей главах рассмотрены проблемы прочности слоистых армированных волокнами пластиков в условиях однородного напряжению-деформированного состояния (НДС) при монотонном возрастании нагрузок и циклическом их повторении вплоть до разрушения; в трех последних главах изучены вопросы кратковременной прочности армированных пластиков при неоднородном НДС (со сквозными дефектами типа вырезов и трещин), а также вопросы возникновения таких дефектов при эксплуатации изделий (локальное контактное низко- и высокоскоростное ударное нагружение).

При анализе современного состояния проблемы расчетной оценки прочности слоистых АТП при одиородном НДС сделаны ссылки на работы В.В. Васильева, В.А. Бунакова, Н.А. Алфутова, П.А. Зиновьева, Б. Розена, П. Пти, Х. Хана, Р. Сандху, и др., в которых отмечено, что создание теории неупругого деформирования монослоев АТП при статическом нагружении многослойного материала вплоть до разрушения встречает значительные трудности, связанные, в основном, с проблемой учета микроповреждений как при нагружении в направлении волокон, так и при поперечно-сдвиговом нагружении.

В работах таких авторов, как Г. Нейбер, В. Вейс, В.В. Новожилов, С.Т. Милейко, К. Смит, М.Е. Уэлдоупс, Дж.Р. Эйзенман, В.Е. Камински, Дж.С. Си, Е.П. Чен, Дж.М. Уитни, Р.Дж. Нуисмер, З.Д. Бажант и др. отмечено, что механика разрушения неоднородных материалов (и АТП, в частности) сталкивается с проблемами двух видов: необходимостью учета микроструктуры материала при создании структурных моделей разрушения и обоснованием некоторых размерных параметров, включаемых в расчеты на прочность по феноменологическим моделям при наличии острых дефектов.

В настоящее время структурные модели связаны с феноменологическими в лучшем случае лишь качественно, подсказывая общий характер зависимостей (Смит К., Милейко С.Т. и др.). В связи с этим в научном плане актуальной является проблема объединения или максимального сближения структурных и феноменологических моделей.

Попытка такого объединения предпринята в данной работе на основе подробного изучения особенностей накопления микроповреждений в монослоях волокнистого композита при одиородном НДС (кинетика деформирования) и на

этой основе перехода к оценке прочности композита при неоднородном НДС (конструкционная прочность, механика разрушения).

Прочность АТП при однородном напряженном состоянии (кинетика деформирования и разрушения)

Деформационные и прочностные характеристики слоистых пластиков при проведении проектных работ невозможно рассчитать без знания упругих свойств монослоев, а также без соответствующих предположений о нелинейном поведении и накоплении микроповреждений в монослоях при их деформировании в составе слоистого композита (прочность и так называемое "посткритическое" поведение монослоев).

1. В связи с этим с целью получения наиболее корректных данных об упругих свойствах монослоев рассмотрен вариант методики определения констант упругости монослоев ортотропных материалов, основанной на двух этапах:

- * прямом определении наибольшего модуля упругости E_1 и соответствующего коэффициента Пуассона ν_{12} на образцах из однонаправленного материала (с одинаково уложенными слоями),
- * косвенном (расчетно-экспериментальном) определении модуля сдвига G_{12} и наименьшего модуля упругости E_2 с использованием значений модулей упругости и коэффициентов Пуассона в нескольких направлениях для слоистого композита с косоперекрестной симметричной укладкой слоев (например, $[\pm 30^\circ]_S$) с помощью разработанной ЭВМ-программы, минимизирующей отклонения расчетных значений упругих характеристик от экспериментальных.

Предлагаемый вариант отличается от известных вдвое меньшей размерностью пространства варьируемых параметров, разделением параметров по значимости, что обеспечивает большую устойчивость решения и, как следствие, большую достоверность результатов.

2. Для прогноза нелинейного "посткритического" поведения монослоя в составе слоистой пластины построены математические модели монослоев при кинематическом нагружении при растяжении, сжатии и сдвиге в направлениях симметрии свойств монослоев, поскольку слои в составе пакета склеены между собой и работают совместно. Для определения этих данных предложено использовать гибридные образцы с ослабленным рабочим сечением для локализации разрушения на базе измерителя деформаций (рис.1б).

В диссертации приведены данные по характеристикам НДС образцов, полученных с помощью МКЭ (плоская задача) и методов фотоупругости. Предло-

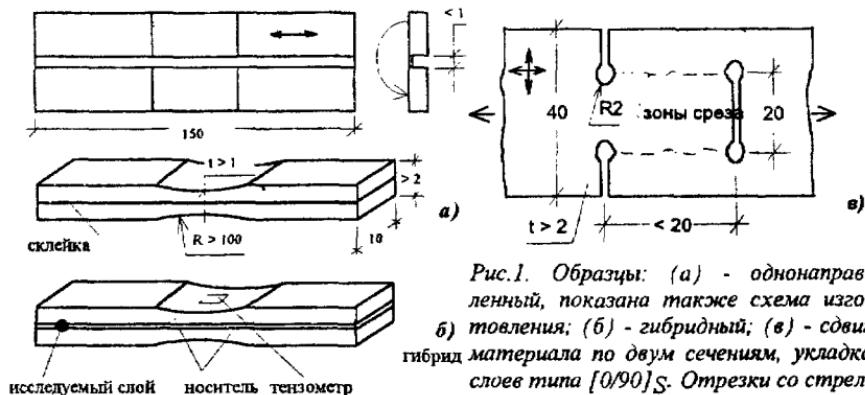


Рис.1. Образцы: (а) - однонаправленный, показана также схема изгото-
б) вления; (б) - гибридный; (в) - сдвиг
гибридного материала по двум сечениям, укладка
слоев типа $[0/90]_S$. Отрезки со стрел-
ками на концах - направление укладки
волокон

жены оригинальные способы изготовления образцов (защищены авторскими свидетельствами) при указанных видах нагружения, обеспечивающие равномерное (с заданной точностью) распределение напряжений в расчетном сечении, локализацию разрушения на базе измерителя деформаций (без отслоения утолщенных частей), а также кинематическое нагружение исследуемого слоя в составе гибридного образца (рис.1б). Абсолютные размеры образцов выбраны так, чтобы в рабочих зонах имела место представительная выборка микроструктурных составляющих пластика.

"Кинематичность" нагружения исследуемого материала проявляется в наличии на его диаграмме "напряжение-деформация" спадающего участка, связанного с интенсивным ростом микроповреждений и падением жесткости материала. Параметры "носителя" обеспечивают устойчивость процесса деформирования гибридного образца ($dP/d\varepsilon > 0$), поскольку его свойства подобраны так, что деформации разрушения и жесткость на растяжение носителя превосходят деформации разрушения и жесткость исследуемого слоя (рис.2).

Для АТП типа стекло-, угле- и органопластиков получены кривые "напряжение-деформация" при растяжении, сжатии и сдвиге вплоть до разрушения с различными скоростями деформирования, разгрузками и выдержками.

Эти данные в комплексе иллюстрируют сложность поведения различных тканевых композитов под нагрузкой, необходимость учета нелинейного упруго-

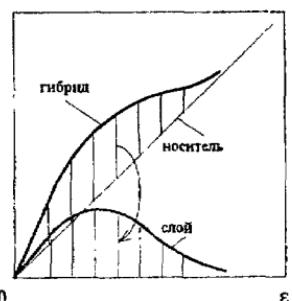


Рис.2. Диаграммы деформирований гибрида, носителя и ис-
следуемого слоя. Р - усилие, ε -
деформация: $\varepsilon_{\text{слоя}} = \varepsilon_{\text{носителя}} = \varepsilon_{\text{гибрида}}$

пластического и вязкого поведения материалов (особенно при сдвиге) и накопления повреждений на всех этапах нагружения, их слиянием и образованием макродефектов, приводящих к разделению материала на части.

3. В предлагаемой работе важная роль отведена изучению сдвигового нагружения в площадках, совпадающих с главными направлениями анизотропии. Это осуществлено с помощью известного метода выделения диаграммы сдвига $\tau - \gamma$ из диаграммы растяжения $\sigma - \epsilon$ образца-полоски с укладкой волокон в слоях типа $[\pm 45^\circ]$.

Программа нагружения включала в себя испытания на нагружение с выдержками и разгрузками, с записью диаграмм $\sigma - \epsilon$ и $\epsilon - t$. Здесь и ниже σ - нормальное напряжение, ϵ - линейная продольная деформация, t - время. Обработка диаграмм (пренебрегали участком кратковременной ползучести, а быстрое нагружение схематизировали мгновенным) позволила выделить склерономную r и реономную p составляющие в деформации сдвига $\gamma = r + p$. Диаграмма $\gamma - \tau$ была вполне удовлетворительно описана моделью микронеоднородного материала (структурный подход, разработанный в трудах Д.А.Гохфельда и О.С.Садакова, в котором среда представляется параллельным набором упруговязкопластических подэлементов с различными пределами текучести). Эксперименты, проведенные в работе, показали, что для рассмотренных угле-, стекло и органопластиков в нормальных условиях реологическая функция $\dot{p}(\tau)$ может быть вполне удовлетворительно аппроксимирована линейной зависимостью $\dot{p} = K\tau$.

Система уравнений равновесия, совместности деформаций подэлементов, физических уравнений может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned}\gamma^k &= \gamma \quad (k = 1, 2, \dots, N); \quad \tau = \sum_{k=1}^N \tau^k q^k; \quad \gamma^k = r^k + p^k; \\ r^k &= \tau^k / G_{12}; \quad p^k = \begin{cases} \dot{p}(\tau^k / z^k), & \tau^k < \tau_T^k; \\ \infty, & \tau^k \geq \tau_T^k. \end{cases}\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь k - номер подэлемента, τ_T - пределы текучести, q - веса, z - коэффициенты, \dot{p}^k - реологическая функция k -го подэлемента.

На рис.3 сплошной линией приведена экспериментальная диаграмма сдвига стеклотекстолита СФ-2-50Г ($d\gamma/dt = 6,6 \cdot 10^{-4}$ 1/c). Для проверки возможностей прогнозирования диаграмм циклического сдвигового нагружения проведены эксперименты и расчеты при полной разгрузке и повторном нагружении (рис.3 прерывистая линия - четыре подэлемента).

При циклическом нагружении вязкоупругих тел происходит превращение поглощенной энергии в тепло и его отдача в окружающую среду, поэтому для оценки тепловыделения весьма важной является энергетическая характеристика ψ - коэффициент рассеяния. Для пульсирующего цикла по структурной модели среды проведены расчеты ψ как функции максимальных касательных напряжений τ_{\max} . Получено, что ее можно аппроксимировать степенной зависимостью типа

$$\psi = m_0 \tau_{\max}^n, \quad (2)$$

причем $n < 1$, а m_0 зависит от частоты (скорости деформирования). Если ограничить диапазон изменения τ_{\max} величиной 0,4-0,8 от предела прочности, а скорость деформирования - статическим диапазоном 10^{-2} - 10^{-4} 1/c, то коэффициент рассеяния ψ оказывается практически постоянным, что важно для технических приложений.

Переход далее от сдвигового деформирования к продольному осуществлен с помощью модели, учитывающей микроструктуру АТП.

4. В тканях гладкого плетения имеют место регулярно искривленные и переплетенные нити основы (позиция 1 на рис. 4) и утка (позиция 2 на рис. 4), которые пропитаны связующим. Любой способ переплетения (полотняный, саржевый, сатиновый и др.) можно представить в виде последовательного соединения (позиция 4 на рис. 4) прямолинейных и наклонных участков нити.

Отметим, что при растяжении прямолинейного участка работают, в основном, высокопрочные и высокомодульные волокна и реологические свойства данного участка несущественны по сравнению с другим участком, где волокна располагаются под некоторым углом α к направлению нагружения.

Растяжение АТП напряжениями σ , монотонно возрастающими во времени со скоростью $\dot{\sigma}$, приводит к появлению касательных на-

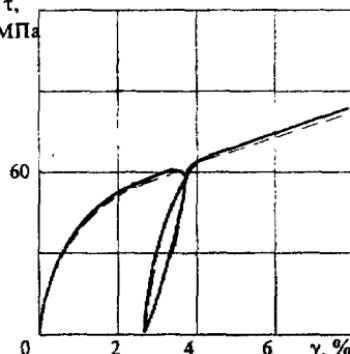


Рис.3. Диаграмма сдвигового деформирования с разгрузкой

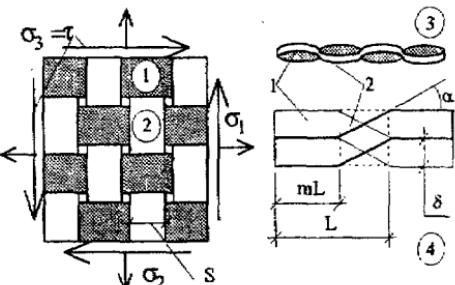


Рис.4. Схема АТП: 1 - нить основы, 2 - нить утка, 3 - сечение АТП вдоль основы, 4 - схематизация структуры АТП при нагружении вдоль нити основы или утка

прожений τ на наклонных участках

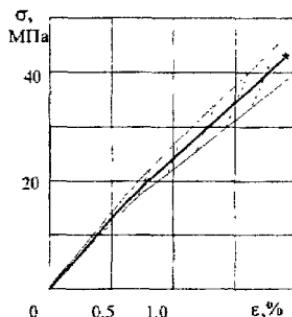
$$\tau \approx \sigma \cdot \sin 2\alpha \quad (3)$$

Указанные выше предположения позволяют дополнить систему уравнений состояния данной модели АТП при монотонном нагружении вдоль основы или утка следующими уравнениями (угол α мал):

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \dot{\sigma} \cdot t; \quad \varepsilon = \varepsilon_1 m + \varepsilon_2 (1-m); \quad \varepsilon_1 = \sigma / E_1; \\ \varepsilon_2 &\approx \varepsilon_1 + \gamma(\tau, \dots) \cdot 2\alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $\gamma(\tau, \dots)$ определяется в соответствии с (1).

Уравнения (1)-(4) позволяют на основании испытаний только на сдвиг и анализа микроструктуры АТП (по его продольным шлифам) прогнозировать его поведение при нагружении вдоль нитей основы или утка. Например, для АТП типа СФ-2-50Г $m=0,2$; $\alpha=12^\circ$ при нагружении со скоростью 2 МПа/сек расчетная кривая "напряжение - деформация" при растяжении вдоль основы показана на рис.5 сплошной линией, а экспериментальные кривые лежат в заштрихованной зоне.



На диаграммах растяжения хорошо видна зона "перелома", где касательный модуль стеклопластика уменьшается практически скачком. Аналогичные кривые были получены на различных стеклопластиках с тканевой арматурой в работах Тарнопольского Ю.М., Скудры А.М. и др. Однако, по-видимому, лишь в данной работе удалось получить адекватное описание наблюдаемого явления, связанного с началом интенсивных сдвиговых пластических деформаций на искривленных участках нитей. Следует также отметить, что изменение скорости нагружения в пределах 1...50 МПа/сек не приводит к существенному изменению предела прочности и характера диаграмм растяжения. Это связано, очевидно, с превалированием склерономной составляющей сдвиговой деформации над реономной, что позволило в расчетах многослойных материалов при однократном кратковременном нагружении обосновать использование наиболее простого склерономного варианта учета сдвиговой нелинейности монослоя АТП.

Следует остановиться более подробно на особенностях деформирования АТП при сжатии вдоль нитей основы или утка. Используя ту же схематизацию микроструктуры (рис.6), можно заметить, что при сжатии вдоль направления 1 или 2 по нормали к плоскости АТП между наклонными участками нитей сосед-

Рис.5. Диаграмма растяжения стеклопластика СФ-2-50Г

них монослоев или в пределах одного слоя должны появиться напряжения растяжения, удерживающие наклонные участки в равновесии. При растяжении АТП в этих местах возникают напряжения сжатия.



Рис.6. Схема искривленного участка нити

Напряжения растяжения в трансверсальном направлении опасны тем, что из-за относительно низкого предела прочности F_{zt} на поперечный отрыв АТП будут иметь, как следствие, и пониженные пределы прочности при сжатии F_{1c} или F_{2c} . Считая, что в момент разрушения предельное состояние равновесия исти характеризуется стержневой схемой, показанной на рис.6, для малых углов α получим следующую зависимость:

$$F_{1c} = F_{zt} \frac{S}{2\delta\alpha}. \quad (5)$$

Для рассматриваемого стеклопластика (см. обозначения на рис.6) $\alpha \approx 12^\circ$, $F_{zt} = 31 \pm 5$ МПа, $S \approx 0,5$ мм, $\delta \approx 0,10$ мм. Тогда $F_{1c} = (31 \pm 5) \cdot 0,5 / (2 \cdot 0,1 \cdot 0,21) = 369 \pm 60$ МПа. Экспериментальные значения пределов прочности при сжатии вдоль утка и осиовы находятся в указанном интервале, что свидетельствует в пользу предлагаемого подхода. Приложение к АТП через накладки даже небольших сжимающих нагрузок в направлении z может задержать трансверсальное разрушение и, следовательно, увеличить замеренные максимальные предельные напряжения (предел прочности при сжатии).

5. Логическим завершением материалов данной части диссертации, где предложены малопараметрические реологические модели АТП, явилось рассмотрение вопросов определения пределов применимости склерономных моделей монослоев в расчетах на прочность многослойных пластин. Показано, что для технических приложений исследованные современные конструкционные пластики в диапазоне квазистатических скоростей деформирования при монотонном нагружении можно считать склерономными. Проведенные на различных АТП авиационно-космического назначения эксперименты показали, что при монотонном кратковременном квазистатическом нагружении со скоростями деформирования $0,01 \text{ c}^{-1} > d\epsilon/dt > 0,0001 \text{ c}^{-1}$ для слоистых угле-, стекло- или органопластиков реономные эффекты несущественны и не могут быть надежно зарегистрированы (кривые "напряжение-деформация" практически неотличимы). Более того, пределы прочности на растяжение изменяются при этом не более, чем на 10%, что сопоставимо с естественным разбросом. Поэтому использование склерономных моделей вполне оправдано для случая кратковременного нагружения вплоть до разрушения.

6. Ближайшим приложением полученных моделей явился рассмотренный в диссертации подход к решению проблемы термовязкоупругой связности и разрушения при циклическом нагружении АТП в звуковом диапазоне частот, которое, в отличие от статического, сопровождается саморазогревом даже при небольших напряжениях. Повышение температуры АТП приводит к снижению его предела прочности $F_x(T)$. Если действующие максимальные напряжения σ_{max} в процессе испытаний поддерживаются неизменными, то, очевидно, будет происходить разрушение термомеханического характера, когда выполнится условие

$$F_x(T) \leq \sigma_{max}. \quad (5)$$

Эти соображения были проверены при испытаниях на выносливость трехслойных панелей шириной 100 мм и длиной 300 мм с тонкими обшивками толщиной 0,7 мм из органопластика марки 10Т (шесть слоев ткани СВМ арт. 56313 сатинового переплетения, ориентированной основой вдоль оси панели, и связующее горячего отверждения УП-2227) и сотовым заполнителем высотой 8 мм при консольном изгибе (частота вынужденных колебаний 150 Гц). В обшивках имело место знакопеременное симметричное изменение напряжений.

Кривые выносливости в двойных логарифмических координатах показаны на рис.7 (1 - естественные условия, 2 - обдув воздухом со скоростью 5 м/с). Во всех случаях разрушения происходило повышение температуры, причем в процессе нагружения температура повышалась практически с постоянной скоростью. В первой серии опытов при малой долговечности ($\lg N = 3...4$) обшивки разогревались до температуры 60...70°C, а при большей ($\lg N = 5...6$) до температуры 90°C и более.

Статические испытания на сжатие при нормальной (20°C) и повышенной (до 90°C) температуре органита 10Т показали, что предел прочности на сжатие уменьшается со 125 МПа до 100 МПа. Однако при повышении температуры выше 110°C происходит резкое падение предела прочности.

В расчетах процесс саморазогрева считали адиабатическим. Пренебрегали также неравномерностью температуры по толщине обшивки ввиду ее малости.

Принятие этих допущений позволяет записать уравнение теплового баланса после нагружения до числа циклов ΔN_i (в пределах этого числа циклов параметры материала считали неизменными):

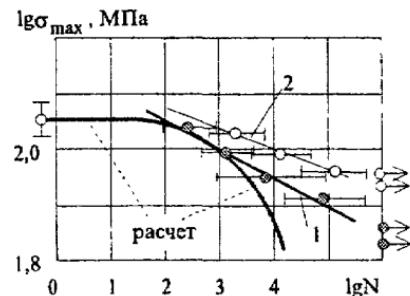


Рис.7. Кривые выносливости

$$\Delta Q_i = CM\Delta T_i, \Delta Q_i \approx \psi \frac{\sigma_{\max}^2 V}{E_x} \Delta N_i, \\ M = \rho \delta S; V = \delta S; \quad i=1,2,\dots \quad (6a)$$

$$\Delta T_i \approx \psi \frac{\sigma_{\max}^2 \Delta N_i}{C\rho E_x}, \quad T_{i+1} = T_i + \Delta T_i. \quad (6b)$$

Здесь i - номер шага расчета, E_x - модуль упругости при нагружении вдоль оси x , Q - энергия саморазогрева, T - температура, C - теплоемкость, ρ - плотность материала обшивки панели, δ - толщина обшивки, S - площадь поверхности теплоотдачи в воздухе, ψ - коэффициент потерь, значение которого для органита в квазистатическом диапазоне скоростей деформирования зависит лишь от максимальных напряжений сжатия в виде $\psi \approx m'(\sigma_{\max} / F_{xc})^{n'}$, причем для органита 10Т в нормальных условиях $m' \approx 0,1$, $n' \approx 0,5$ при напряжениях в пределах от 0,1 до 0,8 от предела прочности. Данная степенная зависимость не случайна, так как рассеяние энергии при растяжении (сжатии) вдоль волокон основы (утка) происходит, в основном, за счет сдвиговых деформаций на наклонных участках нитей (см. выше).

Поскольку пределы прочности на растяжение и сжатие органита 10Т отличаются почти в 5 раз (600 и 125 МПа), то при симметричном цикле, очевидно, превалируют реологические эффекты на той части, где действуют напряжения сжатия.

Термомеханическое условие разрушения в данном случае имеет вид

$$\sigma_{\max} \geq F_{xc}(T), \quad (7)$$

в котором предел прочности на сжатие снижается с ростом температуры (получено экспериментально)

$$F_{xc}(T) \approx F_{xc}(20) - 0,9(T - 20). \quad (8)$$

Суммируя приращение температур в (6) по шагам и проверяя условие разрушения (7), можно вычислить искомую долговечность

$$N = \sum_j \Delta N_j.$$

Расчеты долговечности при заданных максимальных напряжениях представлены на рис.7 прерывистой линией при следующих значениях констант: $m' = 0,1$, $n' = 0,5$, $C = 1,50 \text{ КДж/(кг·град)}$, $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$, $\delta = 0,7 \text{ мм}$, $E_x = 25 \text{ ГПа}$, $F_{xc}(20) = 125 \text{ МПа}$.

Полученные данные удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами первой группы опытов (некоторое отличие в области больших долговечностей можно объяснить неучетом конвективного теплоотвода в

турбулентный слой воздуха, окружающий колеблющуюся на вибростенде панель, а также неучетом теплоемкости сотового заполнителя).

Важно отметить, что при интенсивном обдуве и прочих равных условиях (кривая 2 на рис.7) долговечность обшивок увеличивается почти на порядок - это также соответствует предположению о термомеханическом разрушении при циклическом нагружении.

7. Обобщая полученные выше результаты, разработана склерономная математическая модель монослоя АТП, учитывающая накопление микроповреждений в элементах его структуры, и предназначенная для прогнозирования поведения многослойного АТП при однократном нагружении вплоть до разрушения.

АТП состоят из взаимно ортогональных систем пропитанных связующим нитей основы и утка - так называемых "микропластиков" - композитов с односторонним армированием. Поскольку физические основы механизмов взаимодействия волокон и связующего неизменны в любом композите, анализ связи микроструктуры армированных волокнами пластиков с их макро свойствами проведен с позиций микромеханики (рассмотрено случайное расположение центров волокон и вариация их диаметров). Известно также, что переплетение и связанное с этим регулярное искривление микропластиков приводит к детерминированному снижению механических свойств АТП по сравнению с одноправленными армированными пластиками (ОАП).

Расчетным путем (модель параллельного соединения элементов микроструктуры ОАП - ячеек из материала связующего с волокном в центре, геометрия и свойства назначаются с привлечением датчика случайных чисел) показано, что влияние случайного расположения волокон, а также вариации локальной объемной доли волокон на прочностные характеристики монослоя при трансверсальном и сдвиговом нагружениях несущественны по сравнению с влиянием разбросов локальной прочности волокон и связующего. Данные по геометрии монослоев получены из анализа микрошлифов (работы А.Л.Рабиновича и В.П.Ставрова).

В связи с этим предложена упрощенная структурная модель монослоя армированного волокнами пластика (как одноправленного, так и тканевого), в которой реальная случайная упаковка волокон в монослое заменена регулярной тетрагональной так, что модель материала составлена из элементарных подэлементов, которые геометрически идентичны, работают параллельно и разрушаются случайным образом (принят нормальный закон рассеяния характеристик прочности ячеек, косвенно учитывающий также нерегулярность укладки волокон в монослое и микродефекты типа пористости матрицы и др.) и независимо

по трем механизмам: вдоль волокон (нитей основы), поперек (вдоль нитей утка) и на сдвиг.

Три механизма определяют соответствующие меры поврежденности: W_1, W_2, W_3 - которые изменяются от 0 до 1 в зависимости от максимальных напряжений в неразрушенных ячейках. Физически W - это доля разрушенных ячеек:

$$W_j(\sigma_j, \dots) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_j} \int_0^{p_j} \exp\left[-\frac{(x - M_j)^2}{2S_j^2}\right] dx, \quad (9)$$

$$p_j = \sigma_j / (1 - \zeta_j W_j), \quad \zeta_1 = \zeta_2 = 1, \quad \zeta_3 = 0.$$

Здесь M и S - математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение пределов прочности ячеек (на растяжение или сжатие в направлениях 1 и 2, и при сдвиге) - всего пять пар. Анализ результатов аппроксимации экспериментальных данных по исследованным материалам с помощью предложенной модели позволил принять для технических приложений отношение S/M во всех случаях постоянным и равным 0,20.

Важным понятием при возможной разгрузке и повторном нагружении является напряжение реверса σ_{jr} , которое определяет состояние материала: если действующее значение $\sigma_j < \sigma_{jr}$, то $W_j = W_j(\sigma_{jr})$, иначе $W_j = W_j(\sigma_j)$ - повреждения не залечиваются. Графически изменение связи напряжений и деформаций монослоя при нагружении и разгрузке приведено на рис.8.

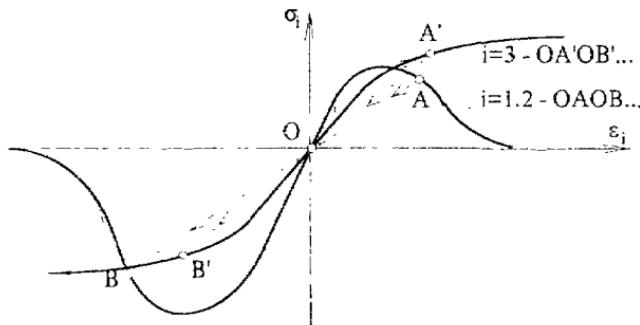


Рис.8. Нагрузка и разгрузка монослоя

8. Для расчета кинетики деформирования и разрушения многослойных композитов с известным способом нагружения и укладкой слоев уравнения классической теории слоистых пластин дополнены склерономной моделью монослоя (вместо модулей упругости присутствуют *секущие* модули слоев, которые зависят от состояния микроповреждения), а также учетом геометрической нелиней-

ности - возможного разворота волокон в слоях (зависимость матрицы поворота T от деформаций) и псевдодеформационным критерием разрушения:

$$Q_{rl}^{c^k} \approx \begin{pmatrix} E_1^c & v_1^c E_2^c & 0 \\ v_2^c E_1^c & E_2^c & 0 \\ 0 & 0 & 2G_{12}^c \end{pmatrix}^k, \quad \begin{pmatrix} E_1^c, v_1^c \\ E_2^c, v_2^c \\ G_{12}^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1, v_1 \\ E_2, v_2 \\ G_{12} \end{pmatrix} \left[1 - \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{pmatrix} \right]; \quad (10)$$

$$\sigma_i = N_i / \sum_k \delta^k, \quad \varepsilon_j (N_j \neq 0) \leq [\varepsilon].$$

Здесь N - погонные усилия, приложенные к пластине в ее плоскости, Q и T - матрицы упругости и поворота, α - ориентация главных осей монослоя в системе координат пластины (может изменяться в процессе деформирования), E и v - модули упругости и коэффициенты Пуассона монослоя в его главных осях, δ - толщина монослоя. В критерии разрушения величина $[\varepsilon]$ назначается такой, чтобы она существенно превосходила реальные деформации разрушения, например, 100%. При достижении (или превышении) усилиями N своего предела деформации слоистого пакета возрастают до бесконечности (матрица A в (10) становится сингулярной). Этот подход по сути представляет собой расчет предельного состояния по критерию потери устойчивости нелинейного деформирования, связанного с накоплением рассеянных микроповреждений.

Использование секущих модулей монослоев в алгоритме является более предпочтительным, чем касательных, так как обеспечивает неизменную положительную определенность матрицы Q^c в выражении (10) и, как следствие, устойчивость решения этого уравнения относительно ε .

Рассмотренная расчетная схема реализована в виде ЭВМ-программы с графическим выводом зависимостей σ - ε , эффективность которой иллюстрируется сопоставлением расчетных (сплошные линии) и экспериментальных диаграмм деформирования (рис.9).

Следует отметить, что в алгоритме не рассматривается возможность расслоения (нет учета кромочных эффектов), поскольку применяемые монослои достаточно тонкие и регулярно чередуются по толщине.

Прочность АТП при неоднородном напряженном состоянии

В этой части диссертации рассмотрены вопросы прочности АТП при неоднородном НДС (конструкционная прочность и механика разрушения) с позиций уже изученных особенностей микроповреждения слоев АТП при однородном НДС.

Обзор литературных источников показал, что создание единой методологической базы для этих двух ветвей механики возможно на пути отказа от рассмотрения сингулярности НДС у трещины за счет осреднения напряжений на некоторой конечной базе и оценки опасности осредненных напряжений по известным критериям.

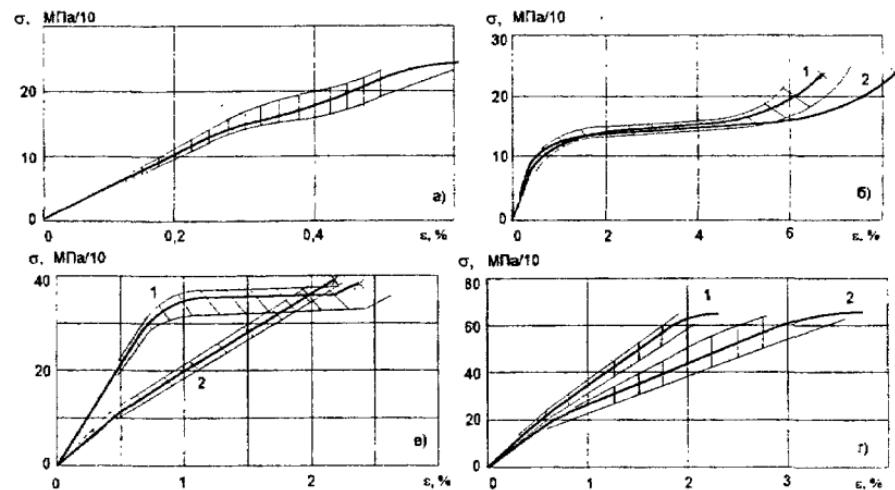


Рис. 9. а) УП КМУ-4Э [0/90 $_2$]_4S, б) УП [±45]_6S; в) гибрид [0%/0%/0%/±45%]_5S, здесь верхние индексы "о" и "у" - органик и углепластик, 1 - нагружение вдоль направления [0°], 2 - вдоль [90°]; г) УП КМУ-4Э [±30]_4S, растяжение вдоль [0]; 1 - деформация ϵ_x ; 2 - деформация $-\epsilon_y$. Заштрихована полоса разброса экспериментальных данных

Анализ источников свидетельствует также, что до настоящего времени для армированных волокнами пластиков не удалось вывести зависимость размеров базы для осреднения напряжений от известных размеров элементов микроструктуры. Не удалось также вывести характеристики трещиностойкости этих материалов из механических (упругих, прочностных) свойств, полученных на стандартных гладких образцах.

1. В связи с этим возникла настоятельная необходимость рассмотрения требований к объему материала (микрообъему), включаемому в зону осреднения напряжений у края концентратора. Данный микрообъем реагирует лишь на средние напряжения на его базе и не реагирует на градиент напряжений. Это связано с тем, что естественное рассеяние характеристик локальной прочности структурных составляющих слаживает влияние градиента напряжений за счет образования зоны микрорастягивания у концентратора; чем больше рассея-

ние, тем больше градиент, к которому данный микрообъем нечувствителен. Здесь уместна ссылка на два хрупких материала: мелкозернистая закаленная сталь и крупнозернистый чугун в условиях одного и того же градиента напряжений. Общеизвестен факт слабой чувствительности чугунов к градиентам напряжений (или, что то же самое, к концентраторам) и существенной чувствительности закаленных сталей.

Поскольку в предлагаемом подходе свойства микрообъема (материала КЭ) должны впоследствии сопоставляться со свойствами гладких образцов (макрообъемов) в соответствии с принятыми критериями прочности, то естественным образом вытекает вопрос о неправомерности такого сопоставления, если макро- и микрообъемы не будут одинаково себя вести при идентичных воздействиях.

Все это ведет к тому, что выборка структурных элементов материала (зерен, частиц, волокон) в микрообъеме должна быть представительной в статистическом аспекте. Таким образом, микрообъем с вероятностью $p=0,95$ должен иметь среднюю прочность S , отличающуюся от прочности макрообъема F не более, чем на $q=5\%$:

$$p[|F-S|/F < q] = P.$$

Вычисление размеров представительного объема невозможно без введения предположений о взаимодействии структурных элементов материала при их деформировании и разрушении (см. ранее изложенную модель параллельного набора геометрически идентичных, деформирующихся одинаково и независимо разрушающихся ячеек - аналог модели пучка нитей).

На базе этих положений показано, что предел прочности (текущести) S микрообъема, содержащего конкретную выборку N подэлементов из генеральной совокупности пропорционален (равен) среднему выборочному значению предела прочности (текущести). Таким образом поставленная выше задача сведена к известной в математической статистике задаче об определении объема выборки при заданной требуемой величине доверительного интервала для оценки среднего. В этих условиях при коэффициенте вариации механических свойств структурных составляющих монослоя не более 0,30 представительная выборка должна содержать не более 150 элементов. При превышении коэффициентом вариации величины 0,30 нормальный закон распределения дает уже при нулевой нагрузке существенную поврежденность и будет неприемлем из-за нарушения физической смысла.

По известным в волокнистом композите величинам: среднему диаметру волокон d , их объемной доле V и способу расположения в пространстве (принята регулярная тетрагональная укладка волокон), можно рассчитать по предложенным формулам габаритные размеры представительного объема моно-

слоя L_x , L_y , L_z , где оси x, y, z - главные оси анизотропии материала. Волокнистый композит является макроанизотропным материалом, поэтому длина представительного объема L_z будет пропорциональна L_x и параметру анизотропии $m_1 = (E_z/G_{xz})^{1/2}$. Это следует из известной в литературе оценки зоны затухания локальной неоднородности НДС в анизотропном теле на базе L_x в направлении оси z (рис.16).

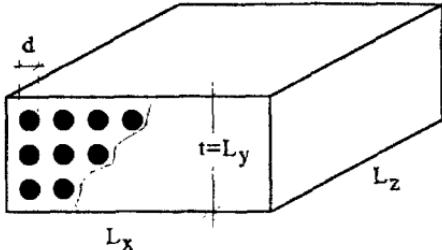


Рис.16. Представительный объем

$E_z/G_{xz} = 25\dots30$, получим с учетом анизотропии $L_z = 0,7\dots0,9$ мм.

В связи с этим, для укладок типа [0/90], [0/ $\pm 45/90$], [± 45] и др. в данной работе при расчетах напряженного состояния элементов угле-, органопластиковых или гибридных конструкций с концентраторами принят минимальный размер конечного элемента A , равный среднему из указанного для L_z диапазона, то есть $A \approx 0,8$ мм.

2. Полученное значение размера КЭ использовано далее для целей экспресс-оценки конструкционной прочности (приближенный метод прогнозирования нагружки полного разрушения) элементов конструкций из АТП с концентраторами. Введены следующие предположения:

- Постулируются формы разрушения конструкции по опасным сечениям;
- Определяются, например, с помощью МКЭ, опасные точки в этих сечениях и осредненные на базе КЭ напряжения s_{max} в них в предположении упругого поведения материала (использованы треугольные элементы с линейной аппроксимацией перемещений внутри элемента, что обеспечивает автоматическое осреднение напряжений на их базе);
- Вычисляются опасные напряжения σ_{op} с использованием экспериментальных либо расчетных кривых деформирования материала и гиперболы Г.Нейбера $\sigma = const$, восстановленной из точки, соответствующей пределу прочности материала (F_x, ε_x) до пересечения с прямой - продолжением упругого участка работы

$$\sigma_{op} = (E F_x \varepsilon_x)^{1/2}.$$

В этом случае реальный материал заменяется идеально упругим, хрупким, имеющим в момент разрушения ту же удельную энергию деформирования, что и реальный материал.

Иными словами, традиционное по форме условие прочности конструкции

$$S_{max} < \sigma_{op} \text{ или } S_{max} < (EF_x \epsilon_x)^{1/2} \quad (11)$$

обретает явный энергетический смысл. Отметим, что в сечениях, работающих на срез, вместо характеристик на растяжение в условие прочности следует подставить соответствующие характеристики на сдвиг.

Для многослойных композитных материалов типа угле-, стекло- и органопластиков экспресс-метод дает удовлетворительные результаты предсказания нагрузок разрушения лишь для псевдоизотропных и близких к ним схем укладки слоев в пластине. В этом случае не происходит существенного перераспределения напряжений и деформаций вследствие предразрушения и изменения геометрии концентратора. Для косоперекрестных укладок $[±\phi]$ и $[0/90]$ экспресс-метод дает значительные погрешности (занижает на 20-30% значения напряжений разрушения). Однако оперативность экспресс-метода и обеспечение гарантированного запаса прочности позволяет рекомендовать его для проведения оптимизационных расчетов: выбирать структуру укладки, подбирать материалы монослоев в пластине и др.

Для определения границы его применимости следует сделать перед основным расчетом по нормальным напряжениям в зоне разрыва анализ прочности по напряжениям сдвига, так как предразрушение обычно происходит вследствие невысокой сдвиговой прочности композитов. Если при растяжении детали разрушение от сдвига у концентратора происходит ранее разрушения от действия нормальных напряжений, то экспресс-метод не даст приемлемого по точности результата.

3. Развитый далее уточненный метод анализа кинетики деформирования и разрушения композитных пластин из АТП с острыми дефектами при нагружении в их плоскости свободен от указанных недостатков экспресс-метода и базируется на использовании МКЭ (инкрементальная постановка, метод перемещений параметров упругости монослоев), где на каждом шаге нагружения определяется напряженное состояние монослоя в каждом конечном элементе, в соответствии с которым корректируется его поврежденность и ориентация волокон (см. описание склерономной модели монослоя в первой части работы). Размеры конечных элементов в зоне разрушения (у дефекта) должны быть определены, как и ранее, из требования включения представительной выборки элементов микроструктуры. Функция перемещений в треугольном КЭ линейная, обеспечивающая постоянство напряжений и деформаций в КЭ (автоматическое осреднение напряжений - рис.17).

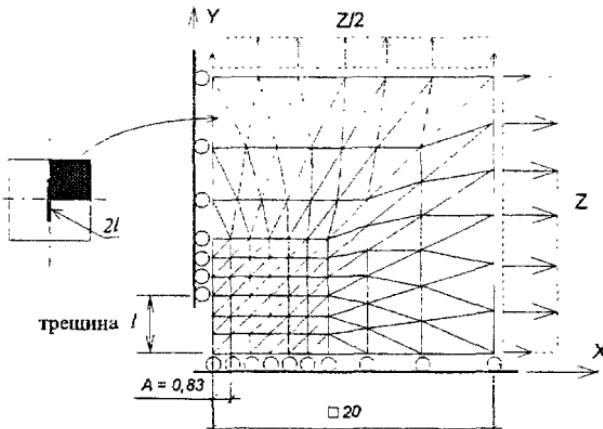


Рис.17. Пример разбики области на КЭ для случая трещины в стенке сосуда давления: z - напряжения в окружном направлении

Схема расчета следующая.

1)Границные условия для сетки КЭ, могут быть смешанными (кинематическими и силовыми):

$$u_i|_{A_1} = u_i^0; \quad \sigma_{ij} n_j|_{A_2} = P_i^0.$$

Здесь u^0 - перемещения на части поверхности A_1 (где заданы перемещения), P^0 - напряжение на части поверхности A_2 (где заданы внешние усилия).

2)Ступенчатое увеличение внешних усилий производится пропорционально параметру p :

$$P_i^0 = \bar{P}_i^0 p, \quad p = p + \Delta p.$$

Величина шага Δp определяет точность расчета нагрузки разрушения.

3)Расчет напряжений в каждом КЭ производится известным способом. из решения задачи теории упругости в секущих модулях (на каждом шаге нагружения) с помощью МКЭ:

$$F = K \{Q^c[\sigma(x)]\} U. \quad (12)$$

Здесь F и U - узловые силы и перемещения, K - матрица жесткости ансамбля КЭ, σ - вектор напряжений в КЭ, $Q^c(\dots)$ - матрица упругости КЭ, записанная через секущие модули монослоев (см. модель монослоя АТП).

4)Разрушение пластины с концентратором формализуется проверкой выполнения неравенства $U_{kt} > [U]$, где U_{kt} - перемещение контрольной точки, например, точки приложения усилия в направлении его действия, а $[U]$ - предельно допустимая величина перемещения (назначается априори). Ошибки назначения $[U]$ в большую сторону не приводят к снижению точности результата расчета нагрузки полного разрушения (или потери устойчивости неупругого деформирования), поскольку в состоянии со значительной поврежденностью

слоев, предшествующем разрушению конструкции, матрица жесткости ее становится плохо обусловленной, что при решении системы уравнений МКЭ на ЭВМ проявляется в резком увеличении перемещений во всех точках.

Достаточную точность решения плоской задачи теории упругости на каждом шаге нагружения можно проиллюстрировать следующим образом. На примере растягиваемой пластины шириной 24 мм с трещиной нормального отрыва длиной 6 мм (аналог бесконечной пластины) и размерами КЭ 0,5 и 1 мм (два варианта расчетов) получено, что отличие расчетных значений средних напряжений во всех КЭ в этих вариантах составило менее 10%. Этот результат является простым следствием использования минимизации потенциальной энергии системы при решении задачи с помощью МКЭ.

Соответствующая разработанному уточненному методу ЭВМ-программа была реализована на IBM-совместимом компьютере и снабжена графическим представлением информации о текущем напряжении состоянии рассчитываемой конструкции, которое позволяет судить о развитии микроповреждений у концентратора (сетка КЭ, окрашенных в цвета, определяемые напряженным состоянием).

4. Сопоставление расчетных и экспериментальных нагрузок полного разрушения при однократном одноосном растяжении пластин шириной B из одно- и многонаправленных конструкционных угле-, стекло-, органопластиков и гибридов (углеорганопластиков) с различными схемами укладки волокон в слоях с центральными (тип А) и краевыми трещинами (тип Б) длиной $2l$, отверстиями и другими вырезами показало, что среднеквадратическая ошибка не превосходит 10% и расчетный механизм разрушения соответствует экспериментальному. Было замечено, что с увеличением количества слоев в пластинах до 10...20 рассеяние экспериментальных данных уменьшается. Это можно объяснить тем, что при изготовлении пластин неточности в направлении укладки слоев в определенной мере взаимно компенсируются с увеличением числа слоев.

На рис.18 и 19 для АТП различной структуры приведены зависимости критических напряжений разрушения σ_c (в долях F_{xt} - предела прочности материала при растяжении в направлении оси X) от относительной длины трещины $2l/B$ (значки - эксперимент, сплошные линии - расчет по предлагаемому методу).

5. В заключительную части диссертации вынесено рассмотрение проблемы прогнозирования макроповреждений типа вмятин и прорывов при случайных локальных ударах, имеющих место при эксплуатации тонких многослойных композитов. Эта часть является звеном, замыкающим рассматриваемую общую проблему оценки прочности композитов на этапе проектирования конструкций: она дает возможность оценивать размеры случайных дефектов и прогнозировать

далее остаточную прочность элементов конструкций с ними, предварительно заменив эквивалентным концентратором типа отверстия или разреза.

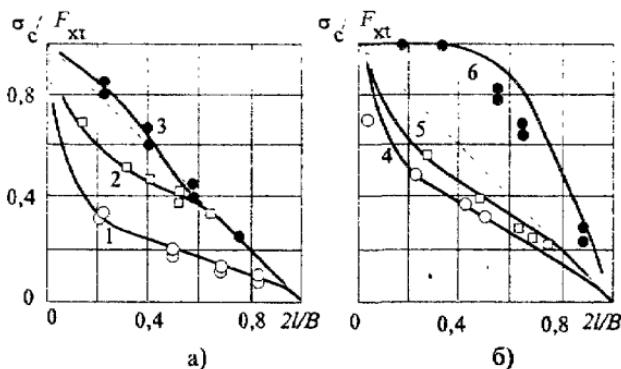


Рис.18. Прочность надрезанных образцов: а) $B = 40$ мм, органит 10Т: 1-[$(0/90)_3/\bar{0}$]_S, 2-[$(0/90)_2/\bar{90}$]_S, 3-[$(\pm 45)_7$]_T; образец типа Б; б) $B = 20$ мм, углепластик КМУ-4Э, 4 - [± 30]_{4S}, $F_{xt}=470$ МПа, 5 - [0]_S, $F_{xt}=820$ МПа, 6 - [± 60]_{1S}, $F_{xt}=85$ МПа; образец типа А ($2l/B > 0,3$) или Б ($2l/B < 0,3$)

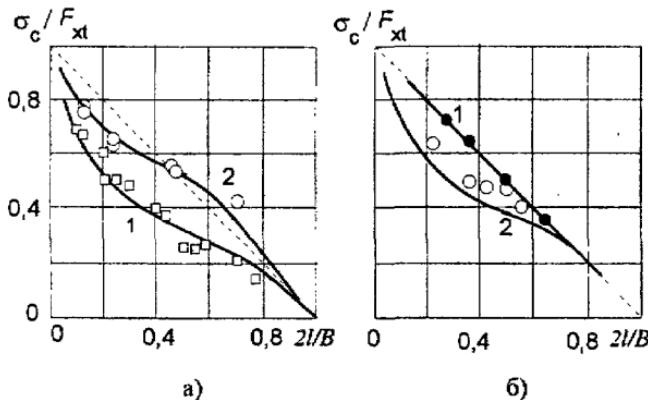


Рис.19. Прочность надрезанных образцов: а) $B = 20$ мм, стеклотекстолит СФ-2-50Г; 1 - [0]₁₂, $F_{xt} = 480$ МПа; 2 - [$\pm 45^{\circ}$]₆, $F_{xt}=166$ МПа; образец типа Б. б) $B = 20$ мм, гибриды (КМУ-4Э и органит 12Т). 1- [$0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/\pm 45^{\circ}$]_{2S}, $F_{xt}=310$ МПа; 2 - [$90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/\pm 45^{\circ}$]_{2S}, $F_{xt} = 340$ МПа, образец типа А

Локальное ударное нагружение условно разделено на два класса: низкоскоростное и высокоскоростное (баллистическое). Рассматривается удар по

трехслойной пластине с тонкими обшивками из АТП и сотовым заполнителем в на жестком основании (аналог предельного случая - удара в зоне силового набора). В этом случае размеры повреждений будут наибольшими и, соответственно, наибольшим будет их влияние на остаточную прочность обшивок.

Основными особенностями работы тонких обшивок на заполнителе при локальном ударе является то, что на тыльной стороне нет откольных явлений и значительная часть энергии удара поглощается заполнителем. Расслоение обшивки происходит даже при малых энергиях удара, однако зона расслоения не выходит за пределы наблюдаемой на поверхности вмятины (получено с применением метода шлифов и голограммической интерферометрии).

На удар испытаны панели с обшивками из слоистого углепластика и органического пластика различных укладок и сотовыми заполнителями из алюминиевой фольги АМг-2Н, ПСП (полимерсотовпласт) и ССП (стеклосотовпласт).

При теоретическом анализе локальной деформируемости предложена схема замены сотового заполнителя при закритическом сжатии моделью жестко-пластического тела с пределом текучести σ_t ; обшивки - тонкой ортотропной мембраной толщиной t . Эллипсовидная форма реальной вмятины заменена ромбом, оси которого (B_1 и B_2) совпадают с осями симметрии упругих свойств обшивки.

В этом случае зависимость "усилие на инденторе P - прогиб обшивки W " имеет вид $P = 2 \left\{ [(A_{11}A_{22})^{0.5} + A_{12}] \sigma_T \right\}^{0.5} W^{1.5}$. Здесь A - компоненты матрицы упругости обшивки-мембранны в законе Гука главных осей (зависимость (10)).

Размеры вмятины (диагонали ромба) равны

$$B_1 = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T} \left(\frac{A_{11}}{A_{22}} \right)^{1/4}} ; \quad B_2 = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T} \left(\frac{A_{22}}{A_{11}} \right)^{1/4}} .$$

Отсюда следует, что применение более прочного заполнителя позволяет уменьшить размеры вмятины при одном и том же воздействии.

Модель деформирования обшивки дополнена моделью прорыва индентором со сферическим основанием радиусом R . Составлено уравнение предельного равновесия индентора и части обшивки, находящейся с ним в контакте (основные предположения: полное расслоение обшивки и разрушение связующего под индентором - работают только волокна). Получена следующая зависимость нагрузки прорыва

$$P^* = 45.2 \frac{[(\sigma_1^* + \sigma_2^*)\delta]^{1.5} R^{1.5} \sigma_T^{0.5}}{[(A_{11}A_{22})^{0.5} + A_{12}]\delta} . \quad (13)$$

где звездочками помечены предельные напряжения в обшивке при двухосном кинематическом нагружении с соотношением деформаций $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = (B_2/B_1)^2$.

Экспериментально получено, что для рассмотренных АТП и сотовых заполнителей отношение нагрузки прорыва к длине трещины прорыва $P^*/2l^*$ практически не зависит от материала обшивки и радиуса индентора: $P^*/2l^* = 0,19 \dots 0,24$. Поэтому для определения длины трещины можно использовать эмпирическую зависимость $2l^* \approx 0,22 P^*$, а P^* определять по формуле (13).

На рис.20 показаны характерные картины вмятины и вмятины с прорывом в центре. Для определения размеров вмятин разработаны способы, использующие теневой муар и голографическую интерферометрию реального времени (рис.21).

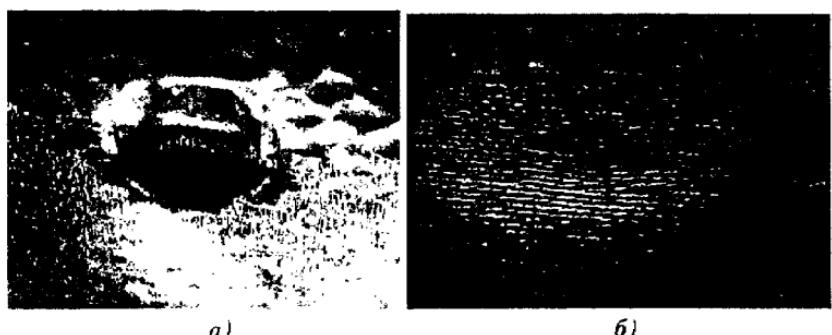


Рис.20. Дефекты обшивок: (a) - углепластик [0/90]; (б)- органопластик

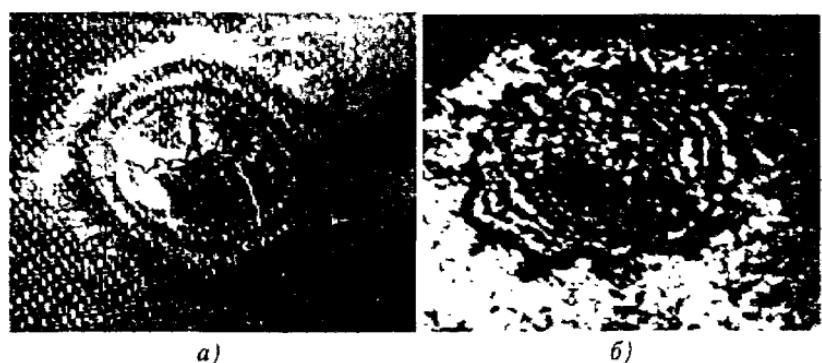


Рис.21. Картинны интерференции: а - метод теневого муара; б - голографии

Сопоставление расчетной и экспериментальной оценок остаточной прочности обшивок показало, что вмятины с трещинами можно заменять круглым отверстием с диаметром, равным длине трещин. В опытах на удар установлено, что длина трещин прорыва достигает 0,6...0,8 диаметра индентора при энергиях, близких к критическим энергиям прорыва.

Анализ формулы (13) показывает, что повышение ударопрочности трехслойных панелей (увеличение нагрузки прорыва обшивки) можно осуществить за счет использования композитов с укладкой [0/90], выполненных из высокопрочных волокон с низким модулем упругости. Среди рассмотренной широкой гаммы материалов (угле-, стекло-, органопластиков и их гибридов) - это АТП на основе органитовых волокон. Эксперименты подтверждают полученные заключения

5.Баллистическое нагружение рассмотренных панелей с тонкими обшивками пулями современного оружия калибрами 5,56...9 мм со скоростями 300...900 м/с, которые превосходят в 3...10 раз критические скорости пробоя, всегда сопровождается появлением дефектной зоны (трещины и отщепление волокон на тыльной стороне) вокруг пробоя. Для дальнейших расчетов остаточной прочности предложено заменять реальный пробой круглым отверстием с диаметром, равным калибру пули. В этом случае различие расчетных и экспериментальных значений остаточной прочности для рассмотренных АТП не превышает 15%.

В рамках задачи проектирования ударопрочных многослойных композитов (учитывая рекомендации, полученные при контактном статическом нагружении) проведен цикл экспериментальных и аналитических исследований, который показал, что многослойные тканевые пакеты без связующего, выполненные из синтетических материалов типа СВМ - аramidные нити сатинового (0/90) переплетения - способны останавливать пулю пистолета Макарова при выстреле в упор по нормали к поверхности без разрушения слоев при весе 1 м² пакета не более 2,5 кг.

Выработаны конкретные рекомендации по изготовлению конструкций защитных панелей бронежилетов минимального веса для торможения заданных пуль при ограничения на величину прогиба (на уровень травмы тела) в месте удара. Наиболее рациональными являются комбинированные конструкции панелей, в которых в наружных слоях использованы ткани СВМ с максимальным удельным модулем (E/p), что обеспечивает прочность нитей, а в тыльных слоях - с минимальным, что обеспечивает минимальных прогиб.

Для расчетной оценки важнейшего параметра - прогиба W слоистого пакета в месте удара недеформируемой пули - выведена зависимость

$$W = k \frac{mV^2}{2} \frac{(a/V)^{5/3}}{Etd}, \quad (14)$$

где m , d , V - масса, калибр и скорость пули, a - скорость звука в нитях, E - модуль упругости нитей, t - толщина слоистого пакета, $k \approx 1,50$ - эмпирическая константа, учитывающая нестрогость введенных допущений (тканевый пакет заменен эквивалентной нитью с осредненными свойствами, которая предполагалась бес-

конечной, линейно упругой, торможение пули принималось равнозамедленным и др.). Зависимость (14) вполне удовлетворительно подтверждается экспериментами с использованием пуль пистолетов Макарова, Стечкина, Марголина, револьвера "Наган" и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Главным результатом данной работы является выявленная *впервые* возможность проведения детального анализа кинетики неупругого деформирования и разрушения слоистого АТП при однородном плоском напряженном состоянии и оценки предельного состояния (разрушения) элементов конструкций из тонких АТП со сквозными концентраторами на общей базе - математическом моделировании накопления рассеянных микроповреждений в монослое АТП.

Используя в качестве исходных данные о сдвиговой реономности монослоя удалось построить малопараметрическую реологическую модель продольного деформирования монослоя АТП, которая учитывает все известные нелинейности. В этой модели использованы данные о геометрии переплетения нитей в АТП, что позволило резко сократить число свободных параметров. На основе этих моделей получено описание реологических свойств АТП при однократном нагружении с разгрузками и циклическом нагружении, осуществлен переход к склерономной модели, на основе которой построены диаграммы деформирования многослойных АТП и их гибридов вплоть до разрушения при монотонно возрастающих напряжениях (однородное напряженное состояние), а также при наличии сквозных дефектов типа острых надрезов (неоднородное напряженное состояние). На этой основе предсказан ряд ранее не замеченных закономерностей деформирования и разрушения многослойных АТП, проявившихся, в частности, в *аномальной зависимости прочности* элементов конструкций от длины надреза для косоперекрестных композитов, в *связи* трансверсальных и продольных характеристик прочности АТП при сжатии, затем экспериментально подтвержденных.

Полученные *новые* результаты могут быть сформулированы следующим образом:

1. Разработанные численные методы оперативного (приближенного) и уточненного расчета предельных (разрушающих) нагрузок тонкостенных элементов конструкций из многослойных АТП со сквозными вырезами и трещинами, использующие МКЭ и ключевое понятие о представительном объеме материала, осреднении напряжений на базе этого объема, а также адекватные модели деформирования и накопления микроповреждений в монослоях, позволили получить инструмент (соответствующие ЭВМ-программы) для выбора

материалов, схемы укладки слоев в конструкции и для оценки вязкости разрушения материалов *на этапе проектирования*, не проводя дорогостоящих экспериментов на образцах с надрезами. Метод оперативной оценки прочности элементов конструкций с вырезами основан на идее разрушения как акта с косвенным учетом неупругости композита в наиболее нагруженном элементе. Данный метод гарантирует получение консервативной оценки конструкционной прочности композита. Уточненный метод рассматривает ступенчатый процесс нагружения конструкции и позволяет учесть как накопление микроповреждений в слоях АТП, так и быстрое перераспределение напряжений из-за предразрушения по иной моде, чем прогнозируется априори.

2. Структурные реологические модели деформирования и разрушения АТП, в которых количество эмпирически определяемых констант (параметров идентификации) существенно сокращено за счет учета микромеханики взаимодействия элементов структуры материала (способа переплетения нитей основы и утка, соотношения числа основных и уточных нитей на единицу длины и др.) позволили с единых позиций - оценки работы искривленных участков нитей в АТП - разработать как способ оценки прочности АТП при сжатии вдоль волокон основы или утка, так и способ приближенного решения связанный задачи термовязкоупругости и разрушения АТП при циклическом изменении напряжений, позволивший *впервые* получить расчетным путем оценку долговечности тонкостенных вибронагруженных конструкций по критерию термо-механического разрушения;
3. Методы выявления повреждений слоистого АТП (гонки обшивки трехслойных панелей с сотовым заполнителем) при эксплуатационных ударных воздействиях, основанные на технике голограммической интерферометрии и теневого муара, позволили в лабораторных условиях идентифицировать как характер повреждения обшивки, так и размеры этих повреждений для последующей оценки остаточной прочности материала обшивок;
4. Исследование характеристик напряженного состояния образцов для испытаний композитов в зависимости от геометрических факторов и параметров анизотропии материала позволило выработать рекомендации по выбору рациональных форм и соотношения размеров образцов при испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг, что дало возможность получить более достоверную информацию о механических свойствах монослоев АТП как при силовом, так и при кинематическом нагружениях; для реализации этих рекомендаций предложен оригинальный способ изготовления образцов, обеспечивающий определение механических свойств с заданной точностью.
5. Экспериментальные и расчетные исследования низкоскоростного локального ударного нагружения многослойных композитов сферическим индентором

позволили установить корреляционные зависимости для прогнозирования размеров вмятин и трещин в тонких обшивках из АТП трехслойных панелей с сотовым заполнителем для оценки их остаточной прочности по экспресс-критерию или уточненным методом.

6. Для случая баллистического нагружения АТП показана возможность замены реальных сквозных дефектов круглым отверстием. Предложенная модель слоистого АТП при высокоскоростном ударе тупым телом позволила дать анализ существующих конструкций бронежилетов и указать пути создания новых конструкций ударопрочных многослойных тканевых материалов на основе комбинации тканей различного переплетения, отличающихся значительным ростом служебных характеристик.
7. Результаты этих исследований, ЭВМ-программы, методики испытаний материалов, рекомендации, использованы на ряде предприятий и в научно-исследовательских институтах (имеются соответствующие документы).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Сапожников С.Б. Дефекты и прочность армированных пластиков: Монография. Челябинск: ЧГТУ, 1994.- 162с.
2. Кузьменко Б.П., Куликов И.К., Сапожников С.Б. Исследование деформаций и напряжений у края отверстия в растягиваемых композитных пластинках // Геометрические методы исследования деформаций и напряжений: Сб. науч. тр. № 182.- Челябинск, ЧПИ. 1976,- С.131-137.
3. Кузьменко Б.П., Сапожников С.Б. Применение метода фотоупругости к исследованию напряженного состояния композитных материалов // Труды 8-й Всес. конф. по методу фотоупругости, т.3. Таллин. 1979.- С.251-252.
4. Кузьменко Б.П., Сапожников С.Б. Микроструктурный подход к прогнозированию статической прочности однонаправленных композитных материалов // Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузлениях: Сб.науч. тр. № 236, Челябинск, ЧПИ. 1979.-С.121-130.
5. Сапожников С.Б. Экспериментальное и аналитическое исследование прочности многослойных углепластиков (информационный материал) // Известия Вузов. Машиностроение, №7. 1980. - С.159.
6. Артеменко С.Б., Пызин Г.П., Сапожников С.Б. Разработка когерентно-оптических методов исследования динамических характеристик элементов конструкций // Труды 5-го Национального конгресса по теоретической и прикладной механике в гидродинамике судна. Варна, Болгария, 25-29 сент. 1985.- С. 25.1-25.12.
7. Сапожников С.Б., Ушаков В.Л. Расчетная оценка повреждения обшивки трехслойной композитной панели с сотовым заполнителем при локальном воз-

действии сферическим ударником // Прочность машин и аппаратов при переменных напряжениях: Темат.сб.науч.тр. / Под ред.О.Ф.Чернявского, Челябинск, ЧПИ, 1989.-С.38-43.

8.Сапожников С.Б., Староверов Ю.А., Ушаков В.Л., Шнайдер Л.Б. Оптимальное проектирование корпуса металлопластикового гидроцилиндра // Тез. докл.2-й Межресп. науч.-тех. конф. "Совершенствование средств и методов расчета изделий машиностроения", г.Волгоград, 2-4 окт.1990. С.27-29.

9.Апайчев М.В., Садаков О.С., Сапожников С.Б., Щульженко С.И. Моделирование реологических свойств слоистых композитов при циклическом нагружении // Проблемы проектирования конструкций // Сб.тр.УрО АН ССР, Миасс, 1991.- с.95-98.

10.Лежнев С.В., Сапожников С.Б. Об едином подходе к оценке конструкционной прочности неоднородных материалов // Там же, с.106-110.

11.Сапожников С.Б. Расчетная оценка прочности и деформативности гибридных композитов // Прочность машин и аппаратов при переменных напряжениях: Тематический сборник научных трудов / Под ред. И.Я. Березина, Челябинск, ЧГТУ, 1991. с.67-75.

12.Сапожников С.Б. Расчет на прочность элементов конструкций из неупругого поликристаллического материала с трещинами // Там же. с.75-81.

13.Сапожников С.Б., Буслаева О.С. Расчетная оценка нагрузки разрушения элементов конструкций из композиционных материалов с концентратором напряжений // Технология, серия: Конструкции из композиционных материалов. М.: ВИМИ, № 1, 1993. - с.9-15.

14.Sapozhnikov S.B. and Buslaeva O.S. A prediction of fracture load of fiber reinforced plastic with arbitrary concentrator under tension // Proc. of COMPLAS IV, Fourth International conference on Computational Plasticity, Fundamentals and application, Barcelona, Spain, 3-6 april, 1995. p.1227-1235.

15.Sapozhnikov S.B. A Numerical Method for Prediction Strength of Fibre Reinforced Plastics with Arbitrary Notches // Ninth International Conference of Composite Materials. Riga, Latvia, October 17-20,1995. - p.3.10.

16.Сапожников С.Б., Буслаева О.С. Оценка повреждений и остаточной прочности обшивки трехслойной пластины с сотовым заполнителем при ударе сферическим индентором // Тезисы III Российской школы по проблемам проектирования неоднородных конструкций, Миасс, 20-22 июня 1995, с.18-19.

17.Сапожников С.Б., Буслаева О.С. Расчетная оценка повреждений обшивки трехслойной пластины с сотовым заполнителем при локальном воздействии сферическим индентором // Тезисы докладов всероссийской конференции "Расчетные методы механики деформируемого твердого тела". Новосибирск, 11-14 сентября, 1995. с.64.

18.Сапожников С.Б. Разработка теории микрооднородных напряженных состояний для оценки прочности армированных пластиков с концентриаторами напряжений (Сообщение 1) // Динамика, прочность и износостойчивость машин. Челябинск: 1995, N1. - с.35-45.

19.Сапожников С.Б. Разработка теории микрооднородных напряженных состояний для оценки прочности армированных пластиков с концентриаторами напряжений (Сообщение 2) // Динамика, прочность и износостойчивость машин. Челябинск: 1995, N2. - с16-23.

20.Заявка № 93042738/02 от 26.08.93 "Композиционный пулезащитный материал", решение о выдаче Патента РФ от 10.12.96 (авторы: Сапожников С.Б., Понькин А.В., Шульженко С.И.).

21.Заявка № 94030188/08 от 18.08.94 "Противопульная броня", решение о выдаче Патента РФ от 25.04.95. (авторы: Сапожников С.Б., Понькин А.В., Шульженко С.И.).

22.Заявка № 94014579/28 от 19.04.94 . "Способ определения места случайного локального ударного воздействия", решение о выдаче Патента РФ от 17.07.95 (авторы: Сапожников С.Б., Буслаева О.С.).

23.Сапожников С.Б. Прочность многослойных пластин из волокнистых композитов со сквозными концентраторами напряжений // Тезисы XV Международной конференции "Математические модели, методы потенциала и конечных элементов в механике деформируемых тел", Санкт-Петербург, 19-22 июня, 1996.

Отпечатано на ротапринте Челябинского ЦНТИ

Формат 60 x 84 $\frac{1}{16}$ Печать офсетная.

Усл.печ. л. 2,25. Уч.изд.л. 1,5.

Тираж 100 экземпляров. Заказ 121.