

На правах рукописи

Шульженко Сергей Иванович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ**

Специальности 01 02 04 - "Механика деформируемого твердого тела",
01 02 06 - "Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры"



Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1997

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете

Научный руководитель -

доктор технических наук, профессор Садаков О.С.

Научный консультант -

кандидат технических наук, доцент Сапожников С.Б.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, Лизин В.Т.

кандидат технических наук, доцент Иванов И.А.

Ведущее предприятие - Государственный ракетный центр "КБ им академика В.П. Макеева" (г. Миасс, Челябинской обл.)

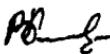
Защита состоится 14 мая 1997г., в ____ часов, на заседании диссертационного совета Д 053.13.01 при Челябинском государственном техническом университете: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧГТУ.

Ваш отзыв в двух экземплярах, скрепленных гербовой 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 " ____ " 1997г.

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

 **В.М. Кононов**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Армированные пластики (АП) находят все большее применение при изготовлении элементов конструкций, работающих в условиях повторно-переменного нагружения. Так например, закрылки, предкрылки, интерцепторы современных самолетов изготавливаются в виде сотовых панелей с обшивками из многослойных АП. За время полетного цикла такие изделия подвергаются как актическому нагружению, так и выдержкам при постоянной нагрузке. За срок эксплуатации самолета количество циклов составляет несколько тысяч. Армированные пластики являются анизотропными реономными материалами. Для некоторых из них, например АП с тканой арматурой, характерна также разная сопротивляемость растяжению и сжатию. При циклическом нагружении таких материалов возможно одностороннее накопление деформаций (даже в случае симметричного цикла) и связанное с этим перераспределение напряжений, что в итоге может привести к разрушению. Существующие модели недостаточно корректно описывают деформационное поведение материала при повторно-переменном нагружении, что делает актуальной задачу разработки более адекватной модели.

Цель диссертации состоит в разработке модели реономного поедения АП при плоском напряженном состоянии, техники ее идентификации и использования в практических расчетах.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Разработан новый вариант структурной модели реономной среды, позволяющий учитывать деформационную, физическую анизотропию и разносопротивляемость АП при плоском напряженном состоянии.

2. Разработана техника идентификации, применительно к материалам, используемым в тонколистовых конструкциях. Проведены экспериментальные исследования деформационных свойств органопластика 12Т, определены параметры модели и произведена ее верификация.

3. Создан численный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния многослойных пластин с сотовым заполнителем с использованием разработанной модели, позволяющий производить уточненный расчет на прочность и жесткость таких элементов конструкций.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанная модель позволяет производить на стадии проектирования сравнение различных конструкций

по прочности и жесткости с учетом неупругих свойств.

На основании проведенного в диссертации анализа поведения модели и свойств армированных пластиков, наиболее часто применяемых в авиационной и ракетной технике, показано, что наибольшие трудности идентификации модели имеют место для тканых АП, применяемых в тонколистовых элементах конструкций. Разработанная в диссертации техника идентификации позволяет получить все характеристики модели опираясь на данные опытов при одноосном нагружении и разгрузке плоских образцов, вырезанных вдоль осей физической симметрии материала и под некоторым углом к ним, определяемым конкретными свойствами АП.

Разработанная в диссертации методика расчета кинетики деформирования многослойных пластин с сотовым заполнителем позволяет произвести уточненный расчет на прочность и жесткость таких конструкций.

Предложенная модель, техника идентификации и методика расчета позволяют решать на стадии проектирования прямую задачу, а именно, обеспечение прочности и жесткости при заданном внешнем воздействии, а на стадии эксплуатации - обратную задачу, т.е. определить остаточный ресурс.

Общая методика исследований. В работе были использованы методы тензорного анализа, метод формализованного моделирования микроапрежений в материале, методы статических испытаний армированных пластиков, пакет прикладных программ метода конечных элементов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и результаты исследований доложены и обсуждены: на 4-м Уральском семинаре по проблемам проектирования конструкций (Миасс 1990г.), на 5-м Уральском семинаре по проблемам проектирования конструкций (Миасс 1991г.), на 7-й межотраслевой научно-технической конференции "Проблемы создания конструкций из композиционных материалов и их внедрение в практику совершенствования новой техники" (Миасс, 1992г.), на научно-технических конференциях Челябинского Государственного технического университета (Челябинск 1995г., 1996г.), на научном семинаре кафедры "Сопротивление материалов, динамики и прочности машин" Челябинского Государственного технического университета (Челябинск 1995г.), на расширенном научном семинаре кафедры "Прикладная механика, динамика и прочность машин" Челябинского Государственного технического университета (Челябинск 1996г.).

Публикации. Основное содержание диссертации и результаты исследований опубликованы в двух статьях и трех тезисах докладов.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав и выводов. Работа изложена на 115 страницах, включая 32 рисунка и 1 таблицу, список литературы из 73 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Поведение материалов при чистой ползучести, релаксации, ступенчатом нагружении обычно описывают с помощью так называемых технических теорий ползучести. Модели такого типа разработаны Л.М. Качановым, Давенпортом, Ю.Н. Работновым, Н.Н. Малинным, Г.М. Хажинским, Удквистом и другими авторами. Как показывает сравнение с экспериментальными данными, поведение пластиков при активном нагружении и выдержках лучше описывается моделями наследственного типа. Последние разработаны в трудах Г.А. Ван Фо Фы, Ю.Н. Работнова, А.А. Ильюшина, Б.Е. Победри, С.Т. Милейко, Э.З. Плуме, С.Л. Рогнинского, А.Р. Ржаницына, Ю.В. Суворовой, А.М. Скудры, Ф.Я. Булавса, в трудах зарубежных авторов Р. Кристенсена, Р. Шепери, Н. Brinson, A. Cardon и других авторов. Однако свойства повторно переменного нагружения отражаются с помощью моделей наследственного типа недостаточно корректно, особенно в тех случаях, когда цикл нагружения содержит несколько этапов знакопеременного нагружения.

Д.А. Гохфельдом, В.С. Зарубиным, И.А. Иваиным, С.Т. Милейко, О.С. Садаковым, Дж. Бессерингом и другими авторами разработана структурная модель реономной среды. Она основана на формализованном отражении микронеоднородности материалов и позволяет описывать деформационную анизотропию, циклическую ползучесть и релаксацию, взаимное влияние этапов быстрого нагружения и выдержек. Апайчевым М.В., Мадудиным В.Н., Садаковым О.С. данная модель обобщена на анизотропные тела. Однако общий алгоритм построения таких моделей отсутствует, а приведенные примеры не относятся к нашему случаю. Кроме того, существующие варианты структурной модели не позволяют описывать разносопротивляемость, присущую композитам.

На основании выполненного обзора в диссертации формулируются следую-

щие задачи:

а) Разработать реологическую модель реономного поведения армированного пластика при плоском напряженном состоянии. Модель должна учитывать физическую анизотропию, разносопротивляемость растяжению и сжатию, проявления нелинейной упругости.

б) Разработать технику идентификации модели конкретного материала.

г) Произвести идентификацию и верификацию модели тканого органопластика 12Т.

д) Разработать алгоритм и выполнить расчет напряженно-деформированного состояния клиновидной пластины - аналога закрылка самолета

2. РЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АРМИРОВАННОГО ПЛАСТИКА

Армированный пластик рассматривается как однородный анизотропный материал. Его неоднородность отражается формализовано на основе представления элементарного объема материала в виде ансамбля подэлементов с простейшими реологическими свойствами. Напряженное состояние композита полагается плоским. Оно отображается тензором $\sigma_{ij}\bar{e}_i\bar{e}_j$, ($i,j = 1,2$), где \bar{e}_i - орты, направленные вдоль осей физической симметрии ортотропной пластины. Интересующая нас составляющая тензора деформаций $\varepsilon_{ij}\bar{e}_i\bar{e}_j$ выражается своими компонентами в том же базисе.

Эти тензоры удобно отображать векторами $\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$ в трехмерном пространстве L_3 , аналогичном пространству А.А. Ильюшина. Метрика L_3 определяется условием: скалярное произведение $\bar{\sigma} \cdot \bar{\varepsilon}$ представляет удельную работу напряжений на изменении деформаций. В ортонормированном базисе $\{\bar{h}_m\}$ ($m = 1,2,3$) пространства L_3 векторы $\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$ характеризуются проекциями σ_m , ε_m , линейно и одинаково связанными с компонентами σ_{ij} , ε_{ij} . Простейший вариант такой связи имеет вид:

$$\sigma_1 = \sigma_{11}, \quad \sigma_2 = \sigma_{22}, \quad \sigma_3 = \sqrt{2}\sigma_{12};$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{11}, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{22}, \quad \varepsilon_3 = \sqrt{2}\varepsilon_{12} = \gamma_{12} / \sqrt{2}.$$

При моделировании деформационных (и прочностных) свойств анизотроп-

ных сред вместо базиса $\{\bar{h}_m\}$ удобней использовать другой ортоинормированный базис $\{\bar{q}_m\}$, непосредственно связанный с симметрией свойств данного материала. Например, при записи закона Гука для ортотропной пластины

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (i,j,k,l = 1,2)$$

в пространстве L_3

$$\bar{\sigma} = \bar{C} \cdot \bar{\epsilon} \quad (1)$$

(\bar{C} - двухвалентный тензор констант упругости, симметричный по соображениям закона сохранения энергии) нетрудно найти главные оси тензора \bar{C} , которые и следует взять в качестве базисных: $\bar{C} = \beta_1 \bar{q}_1 \bar{q}_1 + \beta_2 \bar{q}_2 \bar{q}_2 + \beta_3 \bar{q}_3 \bar{q}_3$. Тогда выражение (1) распадается на три более простых

$$\bar{\sigma} \cdot \bar{q}_m \bar{q}_m = \beta_m \bar{\epsilon} \cdot \bar{q}_m \bar{q}_m \quad (m = 1,2,3). \quad (2)$$

Из соображений симметрии материала следует, что одна из осей \bar{q}_3 для всех ортотропных сред совпадает с \bar{h}_3 ; расположение осей \bar{q}_1 и \bar{q}_2 на плоскости $\{\bar{h}_1, \bar{h}_2\}$ определяется одним коэффициентом k , своим для каждого материала и представляющим его безразмерную характеристику упругости (типа коэффициента Пуассона).

Составляющие вектора $\bar{\sigma}$ - векторы $\bar{\sigma} \cdot \bar{q}_m \bar{q}_m$ будем обозначать $\bar{\sigma}^{(m)}$ ($\bar{\sigma} = \bar{\sigma}^{(1)} + \bar{\sigma}^{(2)} + \bar{\sigma}^{(3)}$); им соответствуют тензоры напряжений, иллюстрированные

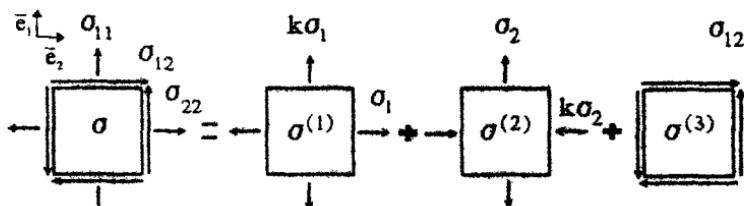


Рис.1. Разложение тензора напряжений σ на собственные составляющие $\sigma^{(1)}, \sigma^{(2)}, \sigma^{(3)}$

рис.1. То же относится к деформациям. Такое разложение аналогично разложению напряжений в изотропном теле на шаровые и девиационные составляющие.

При переходе к неупругому телу было использовано допущение, аналогичное постулату изотропии А.А. Ильюшина: полагалось (в первом приближении), что оси симметрии упругих свойств \bar{q}_1 , \bar{q}_2 остаются осями симметрии свойств в пространстве L_3 и за пределами упругости. Ось \bar{q}_3 остается осью симметрии из простых соображений физической симметрии (если на пластинку действует только касательное напряжение σ_{12} , то деформация может быть только сдвиговой: $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 0$).

Для моделирования реологических свойств используется структурная модель, в соответствии с которой элементарный объем материала представляет совокупность подэлементов деформирующихся совместно. Один подэлемент является идеально упругим, остальные - идеально вязкими. Уравнения модели записываются в виде

$$\begin{aligned}\bar{\epsilon}_v^k &= \bar{r}_v^k + \bar{p}_v^k = \bar{\epsilon}_u = \bar{\epsilon}, \quad \bar{r}_v^k = \sum_{j=1}^3 \bar{r}_v^{k(j)}, \quad \bar{r}_v^{k(j)} = \bar{\sigma}_v^{k(j)} / \beta_j, \\ \bar{r} &= \bar{r}_u g_u + \sum_{k=1}^N \bar{r}_v^k g_v^k, \quad g_u + \sum_{k=1}^N g_v^k = 1, \quad \bar{r}_u = f_1(\epsilon_1) \bar{q}_1 + f_2(\epsilon_2) \bar{q}_2,\end{aligned}\quad (3)$$

где $\bar{\epsilon}$, $\bar{\epsilon}_v^k$, $\bar{\epsilon}_u$ - векторы деформаций элемента объема, вязкого и упругого подэлементов, \bar{r} , \bar{r}_v^k , \bar{r}_u - соответствующие векторы упругих деформаций (приведенных напряжений), \bar{p}_v^k - вектор неупругой деформации подэлемента, ϵ_1, ϵ_2 - проекции вектора деформаций на оси \bar{q}_1 и \bar{q}_2 , g_u, g_v^k - "веса" нелинейно упругого и вязких подэлементов.

Использование структурной модели с идеально вязкими подэлементами позволяет разделить проблемы описания деформационной и физической анизотропии. Деформационная отражается совместной работой пакета подэлементов с отличающимися свойствами; остается существенно более простая проблема - задать свойство идеальной вязкости для подэлемента, учитывая при этом физическую анизотропию. Мы полагаем, что для каждого подэлемента существует потенциал ползучести в пространстве L_3 ; поверхности уровня потенциала близки к эллипсoidам с главными осями, направленными вдоль векторов \bar{q}_m . Реологические свойства записываются в следующем виде:

$$\dot{\bar{p}}_v^k = \phi(r_Q^k / z_k)(\bar{r}_v^k \cdot \bar{Q}) / r_Q^k, \quad r_Q^k = \sqrt{\bar{r}_v^k \cdot \bar{Q} \cdot \bar{r}_v^k},$$

$$\bar{Q} = \bar{q}_1 \bar{q}_1 / (\eta_1(\bar{r}))^2 + \bar{q}_2 \bar{q}_2 / (\lambda_2^2 \eta_2(\bar{r})^2) + \bar{q}_3 \bar{q}_3 / \lambda_3^2, \quad (4)$$

$$\eta_i = 1, \bar{r}_v^k \cdot \bar{q}_i \geq 0, \quad 0 \leq \eta_i < 1, \bar{r}_v^k \cdot \bar{q}_i < 0,$$

где $\dot{\bar{p}}_v^k$ - вектор скорости пластической деформации подэлемента, $\phi(x)$ - реологическая функция, r_Q - эквивалентное напряжение, \bar{Q} - двухвалентный тензор, описывающий потенциал ползучести $\psi = \psi(r_Q)$ ($\dot{\bar{p}} = \partial\psi / \partial(\bar{r}_v^k)$), λ_i, η_i - коэффициенты реологической анизотропии и разносопротивляемости вязких подэлементов, z_k - коэффициенты, характеризующие разброс свойств по подэлементам. Вид поверхности равных потенциалов показан на рис.2.

В соответствии с моделью характеристиками конкретного материала являются константы упругости β, k , скалярные функции $f_1(e_1), f_2(e_2)$, характеризующие поведение нелинейно упругого подэлемента, веса подэлементов g_u, g_k , коэф-

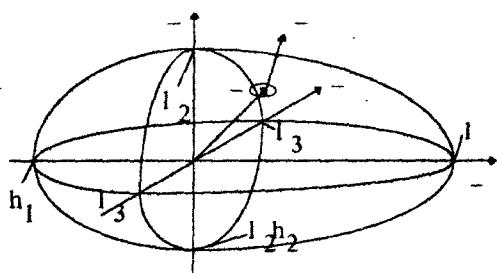


Рис.2. Поверхность равных потенциалов ползучести

фициент разброса свойств z_k , реологическую функцию $\phi(x)$. Анизотропия реологических свойств и разносопротивляемость регламируются четырьмя скалярными параметрами $\lambda_2, \lambda_3, \eta_1, \eta_2$. В диссертации приведен анализ поведения модели, выявивший ее способность описывать особенности поведения армированных пластиков:

непропорциональное деформирование при пропорциональном нагружении (и на-оборот), ограниченную ползучесть и релаксацию, возврат деформаций после разгрузки, сужение петли неупругого гистерезиса и накопление деформаций при циклическом нагружении.

3. ТЕХНИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ

Принципиальной особенностью АП как конструкционных материалов является совмещение фазы изготовления материала с фазой изготовления элемента конструкции. При этом свойства АП зависят не только от свойств компонент, но и от особенностей технологии. Следовательно, задача идентификации должна подразумевать конкретную область применения АП. В диссертации эта задача решается применительно к АП, используемым при изготовлении тонколистовых элементов конструкций.

Константы упругости β_1 , β_2 , k определяются по техническим константам упругости (модули упругости, измеренные вдоль осей физической симметрии материала, соответствующий коэффициент Пуассона) из выражений приведенных в диссертации. Константа β_3 равняется удвоенному модулю сдвига. Последний обычно определяется при растяжения образцов, вырезанных под углом 45° к осям \bar{e}_1 .

Физическая анизотропия существенно затрудняет идентификацию реологических характеристик модели. Проведение испытаний при трех видах плоского напряженного состояния ($\sigma^{(1)}$, $\sigma^{(2)}$, $\sigma^{(3)}$, рис. I) весьма затруднительно, а одноосные нагрузжения произвольно армированных образцов приводят к непропорциональному деформированию и представляют в общем случае комбинацию всех трех составляющих напряжений $\sigma^{(i)}$. Соответственно, замеры определяют сумму трех составляющих деформаций $\varepsilon^{(i)}$. В диссертации предлагается решать задачу идентификации на основе последовательных приближений, опираясь на данные опытов при одноосном нагружении и используя некоторые специфические свойства АП.

Свойства АП при сдвиге предлагается определять из испытаний при растяжении образцов, вырезанных под углом ϑ к оси \bar{e}_1 . При таком виде испытаний в образце реализуется двухосное растяжение со сдвигом. Угол ϑ должен быть таким, чтобы при представлении тензора напряжений в виде (1) отсутствовало слагаемое $\sigma^{(2)}$ ($\operatorname{tg}\vartheta = \sqrt{1/k}$). Сопротивление АП двухосному деформированию ($\sigma^{(1)}$), намного выше сопротивления сдвигу ($\sigma^{(3)}$). Поэтому можно допустить, что неупругая деформация будет только сдвиговой. При этом длина вектора неупругой

деформации

$$p = p_\alpha / \sin(\alpha) , \quad (5)$$

где p_α - величина неупругой деформации, измеренной в опыте. Угол α вычисляется следующим образом:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{2k / (1 + k^2)} . \quad (6)$$

Длина вектора упругой деформации получается делением напряжения на коэффициент упругости β_3 . Таким образом, диаграмма сдвига можно построить соответствующим масштабированием диаграммы растяжения образца, вырезанного под углом θ к одной из осей физической симметрии материала.

Свойства АП при нагружении вдоль \bar{q}_1 , \bar{q}_2 предлагаются определять, используя данные опытов при растяжении и сжатии образцов, вырезанных вдоль осей физической симметрии АП. В общем случае главный базис $\{\bar{q}_m\}$ повернут относительно исходного $\{\bar{h}_m\}$ на угол α . Для однона правленных АП и тканых композитов, у которых модули упругости вдоль направлений армирования отличаются более, чем в два раза исходный $\{\bar{h}_m\}$ и главный $\{\bar{q}_m\}$ базисы практически совпадают. Для тканых композитов на основе стандартных текстильных структур модули упругости отличаются незначительно и угол α лежит в пределах от 0° до 45° . При переходе к неупругому деформированию нарушается прямолинейность траектории деформаций. Однако, в случае нагружения названного вида свойства АП определяются в большей степени поведением упругой арматуры, чем вязкоупругой матрицы, то есть упругие деформации преобладают над неупругими. При этом поворот вектора деформаций относительно невелик (несколько градусов). Поэтому в первом приближении можно считать, что пропорциональность деформирования при пропорциональном нагружении сохраняется и за пределами упругости АП. Диаграммы деформирования в главном базисе \bar{q}_1 , \bar{q}_2 можно получить соответствующей обработкой диаграмм "растяжение - продольная деформация" и "растяжение - поперечная деформация", полученных при испытаниях вдоль \bar{e}_1 . Скалярные параметры, определяющие компоненты тензоров $\sigma^{(1)}$, $\sigma^{(2)}$, $\varepsilon^{(1)}$, $\varepsilon^{(2)}$ (см. рис.1):

$$\sigma_1 = k\sigma_{11} / (1 + k^2), \quad \varepsilon_1 = (\kappa\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) / (1 + k^2),$$

$$\sigma_2 = \sigma_{11} / (1 + k^2), \quad \varepsilon_2 = (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) / (1 + k^2), \quad (7)$$

где σ_{11} - напряжение в образце, $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}$ - продольная и поперечная деформации.

Согласно определяющей системе уравнений модели диаграмма деформирования АП является суммой диаграмм нелинейно упругого подэлемента и вязкой группы подэлементов. Выделение диаграммы деформирования упругого подэлемента и вязкой группы подэлементов из диаграммы деформирования АП предлагается производить опираясь на анализ поведения модели при растяжении с последующей разгрузкой и при сжатии образцов, вырезанных вдоль направлений армирования. Разработана техника такого разделения, опирающаяся на анализ касательных модулей в точке реверса. Разделение диаграмм производится путем последовательных приближений. Вначале проводится опыт на растяжение с разгрузкой. Разность касательных модулей в точке реверса определяется только работой вязких подэлементов, которые в начале этапа разгрузки работают упруго. Это позволяет оценить значение начального наклона диаграммы вязких подэлементов и начального наклона диаграммы и вес упругого подэлемента. Остальные участки диаграмм строятся с учетом того, что жесткость вязкого подэлемента должна постоянно возрастать (этим моделируется распрямление волокон при растяжении). В точке полной разгрузки, исходя из условий равновесия, определяется значение напряжения в вязкой группе подэлементов. Это позволяет построить диаграмму сжатия вязкой группы, которая должна быть центрально подобна диаграмме растяжения этой группы и определить коэффициент подобия. Затем проводятся испытания на сжатие АП. Вычитая из диаграммы АП диаграмму вязкой группы получаем диаграмму сжатия нелинейно упругого подэлемента

Коэффициенты реологической анизотропии λ_2, λ_3 и разносопротивляемости η_1, η_2 определяются по коэффициентам подобия диаграмм вязкой группы на основании анализа мысленных опытов при нагружении вдоль базисных направлений $\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3$. В качестве базового выбран опыт на растяжение вдоль \bar{q}_1 . Сравнение данного опыта с растяжением вдоль \bar{q}_2 и \bar{q}_3 позволяет получить зависи-

смость между коэффициентами λ_2 , λ_3 и коэффициентами центрального подобия диаграмм вязкой группы при таком нагружении, а сравнение опытов на растяжение и сжатие позволяет определить соответственно коэффициенты η_1 и η_2 .

Если реологическая функция задана в виде степенного закона $\phi(r_Q^k) = \zeta(r_Q^k)^n$, то выражения получаются в виде

$$\lambda_i = \chi_i^{(1+n)} \quad (i = 2,3), \quad \eta_j = \theta_j^{(1+n)} \quad (j = 1,2), \quad (8)$$

где χ_i , θ_j - коэффициенты подобия диаграмм, n - показатель степени реологической функции.

Реологическую функцию предлагается определять по коэффициентам подобия серии диаграмм деформирования вдоль одного из главных направлений (удобнее всего \bar{q}_3) с различной скоростью деформирования $\dot{\epsilon}$. Если реологическая функция является степенной зависимостью, то все диаграммы центрально подобны. Коэффициенты подобия диаграмм θ_j , показатель степени реологической функции n и скорость деформирования $\dot{\epsilon}$ связаны между собой следующей зависимостью

$$\lg(\dot{\epsilon}) = \lg \dot{\epsilon}_b + n \lg(\theta_j), \quad (9)$$

где $\dot{\epsilon}_b$ - константа. Величина коэффициента

$$\zeta = \dot{\epsilon}(1 - g_u)^n \lambda_3^{(1+n)} / (\sigma_v^b)^n, \quad (10)$$

где σ_v^b - максимальное напряжение на краю деформирования.

Выбор числа подэлементов N и нахождение их весов и параметров z_k , определяющих различие реологических свойств в подэлементах предлагается производить следующим образом. Вначале выбирается число подэлементов. Параметры z_k и веса g_k аппроксимируют непрерывную функцию. Поэтому можно задать веса и подобрать z_k , чтобы получить нужную диаграмму деформирования, или наоборот, задать z_k и подобрать g_k . При известной реологической функции удобен последний вариант. Зная z_k находим кривые деформирования подэлементов; их веса g_k затем находятся методом наименьших квадратов так, чтобы среднее по полученным диаграммам (с весами) давало нужную кривую. Для этого на оси деформаций выбираем несколько точек (в большем количестве, чем число подэлемен-

тов) и для каждой из них записываем условие осреднения (3). Для всего множества точек условия осреднения дают систему уравнений, в которой число уравнений удобно принять большим, чем число неизвестных. Метод наименьших квадратов (Ланцош) позволяет получить наилучшим образом значения весов g_k .

4. ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ОРГАНОПЛАСТИКА 12Т

Органопластик (ОП) 12Т представляет собой композит, у которого арматурой является ткань СВМ сатинового плетения (восьмивремизный сатин), а связующим - компаунд ЭДТ-69Н. Он применяется при изготовлении обшивок сотовых панелей.

Деформационные свойства ОП 12Т определялись при испытании плоских образцов, вырезанных из пластины в направлении волокон основы и утка и под углом 45° к ним. Технология отверждения матрицы соответствовала реальной технологии при изготовлении сотовых конструкций. Эксперименты по определению деформационных свойств производились на испытательной машине 2054Р-5, позволяющей обеспечивать нагружение с постоянной скоростью перемещения захватов, циклическое знакопостоянное нагружение с заданным размахом усилий и выдержки при постоянном усилии. Для одновременного замера продольной и поперечной деформаций при растяжении был спроектирован и изготовлен специальный деформометр. При испытании на сжатие использовалось приспособление, позволяющее предотвратить потерю устойчивости образца. Механические свойства определялись осреднением по трем опытам, проведенным для каждого вида испытаний.

Обнаружено:

1. Модули упругости вдоль основы и утка неотличимы в пределах разброса экспериментальных данных. Коэффициент упругости k равен 1, остальные упругие константы равны: $\beta_1 = 20400 \text{ МПа}$, $\beta_2 = 36000 \text{ МПа}$, $\beta_3 = 3600 \text{ Мпа}$.
2. Органопластик обладает отчетливо выраженным свойством разносопротивляемости. Однако это свойство связано в большей степени с поведением ткани арматуры, чем вязкоупругой матрицы. Коэффициенты разносопротивляемости языков подэлементов получились равными: $\eta_1 = 0,86$, $\eta_2 = 0,92$. Коэффициенты реологи-

ческой анизотропии - $\lambda_2 = 0,84$, $\lambda_3 = 0,59$. Для адекватного описания свойств ОП 12Т оказалось достаточным 5 подэлементов. Реологическая функция описывается следующей зависимостью: $\phi(x) = 0,00069(x)^{1,3}$. Найденные значения параметров структурной модели использовались в расчетах на циклическое пульсирующее растяжение вдоль волокон и под углом 45° к ним. Сопоставление расчетов с результатами испытаний показывает их удовлетворительное соответствие. Ошибка в определении ширины петли неупругого гистерезиса не превышает 10%. Модель неплохо отражает поцикловое накопление односторонней деформации: ее расчетная величи-

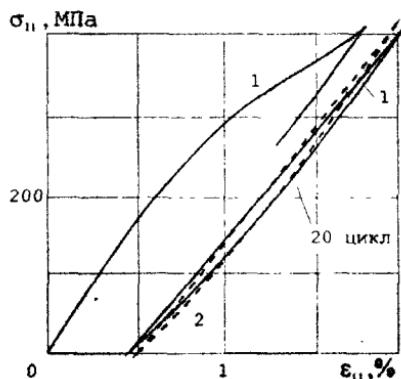


Рис.3. Циклическое пульсирующее растяжение ОП 12Т вдоль волокон
основы: 1 - опыт, 2 - расчет

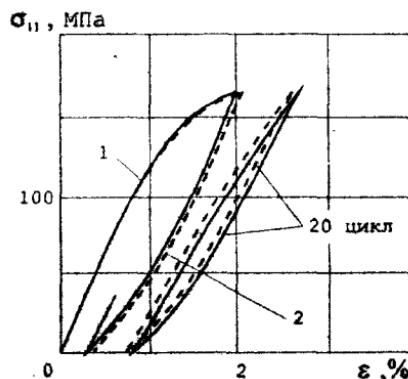


Рис.4. Циклическое пульсирующее растяжение ОП 12Т под углом 45° к волокнам: 1 - опыт, 2 - расчет

на, накопленная к 20 циклу, отличается от экспериментальной не более, чем на 40%.

5. РАСЧЕТ КЛИНОВИДНОЙ ПЛАСТИНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Разработана методика расчета элементов конструкций типа сотовых панелей.

Алгоритм решения нелинейной краевой задачи основан на методе конечных элементов с дополнительными неупругими деформациями. Расчет выполняется

малыми шагами во времени. Каждый шаг расчета делится на два этапа: "упругое" и "неупругое" решения. Первый шаг заключается в решении разрешающей системы уравнений для конечно-элементной конструкции с известными на начало шага дополнительными деформациями в сумме с предполагаемыми приращениями дополнительных деформаций. "Неупругое" решение сводится к определению истинных приращений дополнительных деформаций по найденным из упругого решения величинам напряжений, полных и начальных деформаций с использованием реологической модели.

Реализация данного алгоритма предполагает, что пакет прикладных программ (ППП) конечноэлементной модели должен позволять производить учет дополнительных деформаций, доступ к данным и их корректировку в процессе расчета и возможность создания программы-надстройки. Такими возможностями обладает ППП "Диана", который и был использован в диссертации. Разработана программа-надстройка к ППП "Диана" в которой помимо реализации описанного выше алгоритма реализован известный метод подконструкций, позволяющий выделить область неупругого деформирования конструкции в отдельную подконструкцию, только для которой и производится учет дополнительных деформаций, их корректировка в ходе расчета.

Для демонстрации возможностей использования реологической модели в расчетах кинетики деформирования реальных конструкций в диссертации проведен расчет консольно закрепленной сотовой панели клиновидной формы, работающей в условиях сходных с работой закрылка самолета: нагружение равномерно - распределенной нагрузкой, выдержка в течении 100 сек и разгрузка. Обшивки панели выполнены из многослойного АП и состоят из 4 слоев органопластика 12T и четырехслойного пакета углепластика с укладкой [0°/90°/-45°].

При циклическом нагружении данного элемента конструкции слои органопластика разгружались, вследствие циклической ползучести, а слои углепластика - догружались. Процесс перераспределения напряжений практически заканчивался к 20 циклу. Величина догрузки углепластиковых слоев составляла примерно 40% в верхней обшивке и 50% в нижней обшивке, что существенно влияет на прочность конструкции. Такое перераспределение напряжений необходимо учитывать в расчетах на прочность.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана реологическая модель ортотропного материала при плоском напряженном состоянии. Она основана на структурной модели вязкоупругой среды и представляет собой группу подэлементов, деформирующихся совместно. Для отражения эффектов разносопротивляемости армирующих волокон введен иелинейно упругий подэлемент. Остальные подэлементы - вязкоупругие. Впервые получено выражение для потенциала ползучести с учетом разносопротивляемости и анизотропии на основе представления тензоров напряжений и деформаций в базисе ортогональных тензоров.
2. Разработана техника идентификации модели применительно к материалам, используемым для изготовления тоиколистовых элементов конструкций. Она позволяет получить необходимые характеристики материала из опытов при одномоментном нагружении образцов, вырезанных вдоль осей физической симметрии материала и под определенным углом к ним. Разработана методика определения характеристик вязкоупругих подэлементов применительно к материалам с невысокой иелинейностью вязкоупругих свойств.
3. Произведена идентификация модели органопластика (ОП) 12Т. Показано, что анизотропия и разносопротивляемость ОП 12Т определяются, в основном, поведением волокон. Сопротивление сдвигу в площадках, ортогональных направлению укладки волокон, значительно меньше сопротивления растяжению и сжатию вдоль волокон. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных при пульсирующем растяжении позволило сделать вывод об удовлетворительном их соответствии.
4. Разработана методика расчета кинетики деформирования многослойных пластин с сотовым заполнителем. Расчет основан на методе конечных элементов; используется метод дополнительных деформаций. Реологическая модель включается в состав пакета прикладных программ и позволяет рассчитывать напряжено-деформированное состояние (НДС) деталей такого типа. Расчет НДС обшивки клиновидной пластины с сотовым заполнителем, произведенный в качестве примера, показал существенное влияние описываемых эффектов на работоспособность конструкции.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ

1. Сапожников С.Б., Шульженко С.И. Исследование деформационных свойств органопластика 12Т при растяжении и сжатии вдоль волокон: Тезисы докладов// 4 Уральский семинар по проблемам проектирования конструкций. - Миасс, 20-22 июля 1990.
2. Сапожников С.Б., Шульженко С.И., Буслаева О.С. Исследование деформационных и прочностных характеристик органопластика 12Т при сдвиге: Тезисы докладов// 4 Уральский семинар по проблемам проектирования конструкций. - Миасс, 20- 22 июля 1990.
3. Шульженко С.И. К описанию деформационных свойств органопластика на основе структурной модели среды// Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузлениях: Тематический сб. науч. трудов. - Челябинск: ЧГТУ, 1991. - С.82-86.
4. Апайчев М.В., Садаков О.С., Сапожников С.Б., Шульженко С.И. Моделирование реологических свойств слоистых композитов при циклическом нагружении// Проблемы проектирования конструкций. Сб. трудов УрО АН СССР. - Миасс, 1992. - С.10-14.
5. Апайчев М.В., Садаков О.С., Сапожников С.Б., Шульженко С.И. Циклическая пластичность и ползучесть органопластиков: Тезисы докладов// VII Межгосударственная научно-техническая конференция "Проблемы создания конструкций из композиционных материалов и их внедрение в практику совершенствования образцов новой техники". - Миасс, 8-10 сентября 1992.

**Издательство Челябинского
государственного технического университета**

ЛР № 020364 от 20.01.92. Подписано в печать 25.05.97. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,99. Тираж 100 экз. Заказ 105 / 137.

УОП издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.