

7.02.06
5 924

На правах рукописи

БУСЛАЕВА Ольга Станиславовна

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ, РАЗРУШЕНИЕ И ОСТАТОЧНАЯ ПРОЧНОСТЬ
ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ НИЗКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ**

**Специальность 01.02.06 – "Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры"**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Челябинск-1996

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, профессор Жилкин В.А.;

кандидат технических наук, доцент Мокеев В.В.

Ведущее предприятие – Государственный ракетный центр “КБ им. академика В.П.Макеева” (г.Миасс, Челябинской обл.).

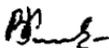
Защита состоится 27 ноября 1996г., в ____ часов, на заседании диссертационного совета Д 053.13.01 при Челябинском государственном техническом университете: 454080, г.Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

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 " ____ " _____ 1996г.

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

 В.М.Кононов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время трехслойные панели с сотовым наполнителем и композитными обшивками широко используются в строительстве в качестве ограждающих и несущих конструкций, в машиностроении (грузовые контейнеры, рефрижераторы, вагоны и др.), в химической промышленности (резервуары для обработки отходов химических производств, трубопроводы для отвода газов, элеваторы и др.), в судостроении (корпуса малых судов, элементы интерьера, перекрытия), в авиации в качестве силовых и несилловых элементов планера и других отраслях промышленности. Наряду с известными преимуществами (хорошая звуко-, теплоизолирующая способность, лучшие характеристики выносливости и др.) по сравнению с традиционными стрингерными и монолитными панелями сотовые конструкции имеют ряд недостатков, одним из которых является слабое сопротивление случайным локальным ударным воздействиям (падение инструмента, удары камней со взлетно-посадочной полосы и т.п.). Такие воздействия вызывают различные повреждения (вмятины, расслоения, прорывы обшивки и т.д.), которые могут заметно снизить прочность конструкции.

Множественность механизмов разрушения, анизотропия материалов, многопараметричность конструкций трехслойных сотовых панелей с композитными обшивками, а так же слабая освещенность в литературе, приводит к необходимости дорогостоящего экспериментального определения их ударопрочности на этапе доводки конструкции.

Цель диссертации состоит в разработке расчетных моделей деформирования и разрушения тонкостенных композитных обшивок трехслойных сотовых панелей (в дальнейшем трехслойные панели), испытывающих локальный поперечный (по нормали к поверхности) низкоскоростной удар твердым телом и оценке прочности обшивки с дефектом при растяжении.

Научная новизна теоретических и экспериментальных результатов, полученных в данной диссертации, заключается в том, что впервые

- экспериментальным путем обнаружена независимость кривых локального контактного деформирования (функции усилия на инденторе от прогиба обшивки в месте контакта) от радиуса сферического основания индентора для тонких анизотропных обшивок панелей с сотовым наполнителем. В проведенных экспериментах обшивки были выполнены из слоистых органо-, углепластиков и гибридов на их основе, а наполнители - из стеклосотопласта, полимерсотопласта и алюминиевой фольги с размером ячейки 2,5 мм; радиус сферического основания индентора

изменялся в диапазоне 2...15 мм, что превышает толщину обшивки панели в 3...40 раз. Сочетание материалов обшивки и заполнителя, изученное в данной работе, перекрывает большинство существующих сейчас случаев использования трехслойных панелей в химическом машиностроении, строительстве и авиации.

- получено теоретическое описание экспериментальных кривых контактного деформирования с помощью разработанной в диссертации аналитической модели контактного деформирования при нагружении панели сосредоточенной силой с использованием упругих констант материала обшивки и нового параметра - напряжения квазитекучести при закритическом сжатии сотового заполнителя вдоль граней сот.

- разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать нагрузку, соответствующую прорыву обшивки из армированного волокнами пластика сотовой панели, и размер этого прорыва при квазистатическом контактном деформировании индентором со сферическим основанием, учитывающая прочностные свойства заполнителя и армирующих волокон в каждом слое обшивки и способ укладки этих волокон по толщине.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные модели позволяют производить на стадии проектирования сравнение различных конструкций по ударопрочности и находить рациональную укладку обшивки трехслойных сотовых панелей, обеспечивающую более высокие значения нагрузки прорыва обшивки и остаточную прочность, т. е. прочность элемента конструкции при наличии в ней дефекта.

Типовые технологические процессы изготовления трехслойных сотовых панелей, даже те, в которых осуществляется автоматическое регулирование температуры и давления прессования, в ряде случаев может привести к существенной вариации объемной доли волокон в композите и соответственно к вариации механических свойств материала обшивки (модули упругости, пределы прочности) и ее толщины. Теоретический анализ полученных зависимостей ("усилие со стороны индентора - прогиб обшивки", а также "усилие прорыва обшивки - радиус сферического основания индентора") показал, что для обшивки из армированного высокомодульными, высокопрочными волокнами пластика такая вариация объемной доли волокон не оказывает влияния на вид этих зависимостей. Вид этих зависимостей определяется только количеством волокон и способом их укладки по толщине. Этот факт позволяет вывести из рассмотрения случайное изменение технологических параметров при производстве сотовых панелей.

Замена реального дефекта на эквивалентный концентратор типа острого надреза с длиной, определяемой по разработанным моделям, позволяет существенно упростить оценку остаточной прочности элемента конструкции.

Проведенное экспериментальное исследование показывает возможность применение теории Герца для оценки динамических характеристик ударного воздействия (продолжительность удара, максимальное контактное усилие, величина прогиба и т.д.) с использованием квазистатических диаграмм контактного деформирования.

Применительно к оценке прочности при случайном ударном нагружении сотовых конструкций самолета бетонной крошкой со взлетно-посадочной полосы экспериментально показана возможность замены гравия фракции 10...20 мм с вероятностью 0,90 на сферический индентор диаметром 8...16 мм.

Предложенный комплекс моделей и методов позволяет на стадии проектирования решать прямую задачу, а именно, обеспечение прочности при заданном ударном воздействии, а на стадии эксплуатации - обратную задачу, т.е. нормировать воздействие на конструкцию с позиции предельного допустимого снижения остаточной прочности

Общая методика исследований. Для решения поставленных в работе задач были использованы методы теневого муара, электро- и вибротензометрий, методы теории вероятности и математической статистики, метод конечных элементов, метод быстрого преобразования Фурье при фильтрации шумов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и результаты исследований доложены и обсуждены: на 7-й межотраслевой научно-технической конференции "Проблемы создания конструкций из композиционных материалов и их внедрение в практику совершенствования образцов новой техники" (Миасс, 1992г.); в работе 3-й Российской школы по проблемам проектирования неоднородных конструкций (Миасс, 1995г.); на научно-технической конференции "Расчетные методы механики деформируемого твердого тела" (Новосибирск, 1995г.); на научно-технической конференции Челябинского государственного технического университета (Челябинск, 1995г.); 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 3 статьях, в 3 тезисах доклада и 1 авторском свидетельстве на изобретение.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов и приложения. Работа изложена на 156 страницах, включая 54 рисунка и 7 таблиц, список литературы из 139 наименований. Приложение на 12 страницах: в него вынесены вопросы связанные с идентификацией и верификацией разработанных моделей.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Разработанные к настоящему времени модели и методы исследований позволяют достаточно полно изучать деформирование слоистых композитных конструкций при ударе, используя схемы балок и пластин, работающих, в основном, на изгиб. Эти вопросы разработаны в трудах Селихова А.Ф., Синсаренко С.И., Васильева В.В., Римского В.Х., Преображенского И.Н., Богдановича А.Е., Ярве Э.В., Музыченко В.П., Дроздова М.А., Щугорова В.Н., Парневского В.В., Болотина В.В., Баженова В.Г., Трунина Ю.П., Ушакова А.Е., Чижова В.М., в трудах зарубежных авторов Доубинса А.И., Грешука Л.Б., Кэрнза Д.С., Рикардса Р.Б., Лагейса П.Н., Dorey G., Morton J., Carden H., Davis M.J. и других авторов. Однако для тонких композитных обшивок сотовых панелей при локальном ударе, разработанные модели балок и пластин применить не удастся, так как наличие сотового заполнителя как основания существенно усложняет анализ. В связи с этим в настоящее время деформирование и разрушение таких конструкций изучается, в основном, экспериментально. Некоторые особенности поведения сотовых конструкций при ударе можно найти в работах Rhodes M.D., Bernard M.L., Lagace P.A., Wilson Tsang P.H., Dugundji J., Sharma A.V., Abbot R., Jonas P.J., Shin W.K., Oplinger D.W., Slepetz J.M. и других авторов.

На основании выполненного обзора в диссертации формулируются основные задачи:

- провести экспериментальное исследование локального контактного деформирования и разрушения сотовых панелей с тонкими композитными обшивками при вариации диаметра индентора, материала сотового заполнителя и обшивок;
- разработать математическую модель, описывающую деформирование тонкостенной обшивки трехслойной панели при локальном квазистатическом нагружении;

- разработать методику для прогнозирования нагрузок прорыва обшивки сферическим индентором;
- оценить прочность обшивки с реальным дефектом при растяжении.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ УДАРЕ

Испытаны панели со следующими характеристиками: обшивка из органоэластика (ОП) 10Т с укладками $[0]_4$ и $[\pm 45]_2$ (толщина обшивок 0,6 мм), наполнитель из стеклосотопласта (ССП) высотой 8,5 мм и размером ячейки 2,5 мм; обшивка толщиной 0,39 мм из углеэластика (УП) КМУ-4Э с укладкой $[\pm 45/0]_T$ и с наполнителем из алюминиевой фольги АМг-2Н высотой 18,6 мм и размером ячейки 2,5 мм; обшивка толщиной 0,65 мм из УП КМУ-4Э с укладкой $[\pm 45]_2$ и с наполнителем из полимерсотопласта (ПСП) высотой 10,5 мм и размером ячейки 2,5 мм; обшивка толщиной 0,84 мм из углеорганопластика $[[\pm 45^{ОП}]_2/0^{УП}]_T$ и наполнителем из СП. Образцы укладывались на жесткое основание (как наиболее опасный случай, например, удар вблизи опоры) и подвергались локальному поперечному (по нормали к поверхности) нагружению. Размеры панелей были выбраны таким образом, чтобы исключить потерю устойчивости обшивки в процессе нагружения.

Проведено три серии испытаний (1 - при локальном поперечном ударе сферическим индентором, 2- при квазистатическом контактном нагружении сферическим индентором, 3 - при квазистатическом контактном нагружении гравием). Испытания образцов первой серии производились на установке маятникового типа индентором со сферическим основанием диаметром 10 мм. Во время удара сигнал с пьезокерамического акселерометра Д14, установленного на инденторе, записывался на запоминающий осциллограф С8-17 в виде развертки ускорения во времени ("a-t"). Полученные осциллограммы подвергали фильтрации от высокочастотных шумов с помощью известного спектрального метода с использованием быстрого преобразования Фурье. Диаграммы контактного деформирования получены путем двойного интегрирования отфильтрованных осциллограмм, считая индентор жестким телом (рис. 1). Здесь же приведены результаты испытаний второй серии образцов. На рис. 1 и ниже заштрихованной

* Вид укладки дан по международному коду ориентации волокон в слоях композитных материалов, предложенный Лабораторией материалов ВВС США.

областью показан разброс экспериментальных данных. Энергию удара в испытаниях изменяли в диапазоне 0,5...10 Дж.

Образцы второй серии нагружали квазистатически сферическим индентором. Радиус индентора изменялся от 2 до 15 мм. Испытания проводили на сжатие машине типа 2055-Р0,5. Размеры полученных дефектов определены методом теневого муара (линейчатый растр, источник света и угол наблюдения были выбраны таким образом, чтобы первая полоса соответствовала прогибу обшивки 0,1 мм).

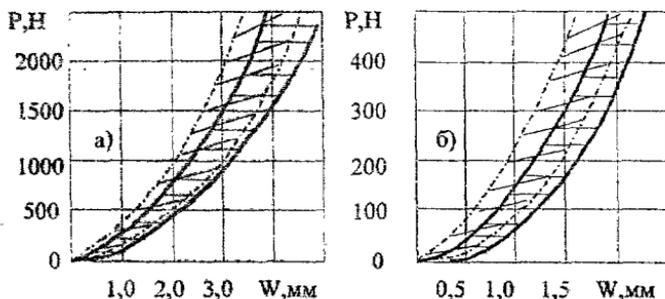


Рис. 1. Диаграммы контактного деформирования:

а) обшивка ОП [0]; б) обшивка из УП [0/±45];

— удар; - - - - квазистатическое деформирование

Результаты испытаний показали следующее:

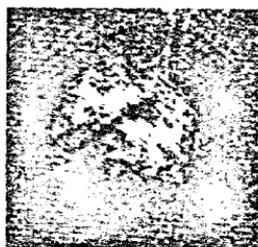
- средние диаграммы контактного деформирования при квазистатическом и ударном воздействиях хорошо коррелируют между собой;

- характер и размеры повреждений, возникающих в обшивках при ударном и квазистатическом контактных воздействиях при одинаковых энергиях практически совпадают (рис. 2). Максимальное отличие в размерах повреждений не превышает 5%;

- максимальное отличие в нагрузках, соответствующих прорыву обшивки в случае ударного воздействия и квазистатического контактного деформирования для обшивок из УП КМУ-4Э [±45/0]_Г и [±45]_Б не превышает 15% (были испытаны в среднем по 10 панелей);



а)



б)

Рис.2. Разрушение в обшивке из УП [$\pm 45/0$]_r трехслойной панели с наполнителем из АМг-2Н, подверженной статическому вдавливанию и удару стальным шаром диаметром 10 мм:

а) статическое вдавливание ($P=500$ Н); б) удар ($V_0=2,5$ м/с)

- диаграмма контактного деформирования практически не зависит от размера индентора (см. рис. 3, где показаны осредненные диаграммы с участками разгрузки, полученные по 10 испытаниям).

Третья серия образцов, как и вторая, нагружалась квазистатически индентором из гравия фракции 10...20 мм (такие фракции применяются для жестких покрытий аэродромов). Диаграммы контактного деформирования сферическим индентором диаметром 10...30 мм и гравием представлены на рис. 4, откуда следует, что эти диаграммы близки. Поэтому далее исследование поведения трехслойных сотовых панелей с тонкими обшивками из армированных

пластиков при ударе производили на панелях при квазистатическом контактном деформировании индентором со сферическим основанием.

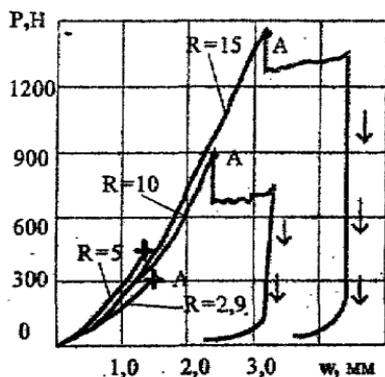


Рис.3. Диаграмма контактного деформирования (обшивка из УП [$\pm 45/0$]_r, наполнитель из АМг-2Н)

МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Выше, показано, что испытания на удар можно заменить квазистатическими испытаниями. Это позволило разработать математическую модель деформирования тонкой обшивки сотовой панели при

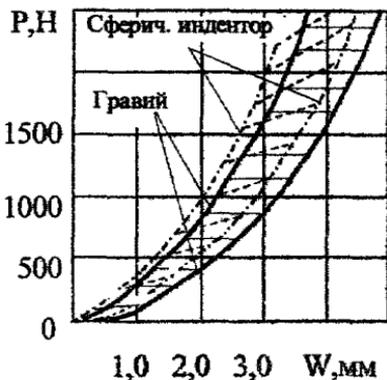


Рис. 4. Диаграммы контактного деформирования

Форма вмятины аппроксимирована пирамидой высотой w , основанием которой является ромб с полуосями a_1 , a_2 (1 и 2 - главные оси симметрии упругих свойств материала обшивки).

Рассматривая нагружение обшивки сосредоточенной силой, так как выше показано, что диаграмма контактного деформирования практически не зависит от диаметра индентора.

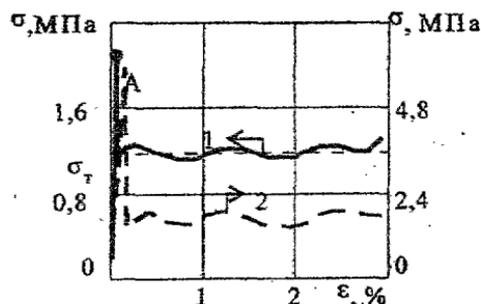


Рис. 5. Диаграммы деформирования
заполнителя:
1 - АМГ-2Н; 2 - ССП

квасистатическом контактом нагружении. Модель основывается на следующих допущениях.

- Обшивка - упругая ортотропная мембрана.

- Заполнитель - идеальное жесткопластическое тело с пределом текучести σ_T . Экспериментально были определены значения σ_T для типовых заполнителей из ССП, ПСП и АМГ-2Н. Характерные диаграммы при равномерном сжатии заполнителя вдоль граней сот показаны на рис. 5.

- Форма вмятины аппроксимиро-

вана пирамидой высотой w , основанием которой является ромб с полуосями a_1 , a_2 (1 и 2 - главные оси симметрии упругих свойств материала обшивки).

Принято, что прогибы обшивки малы, то есть

$$w \ll a_1, \quad w \ll a_2. \quad (1)$$

На рис. 6 представлена расчетная схема искривленной части обшивки. Параметры пирамиды w , a_1 и a_2 принимаем за обобщенные координаты. Варьируя их в выражении принципа возможных перемещений, получим систему уравнений

$$P = \frac{2}{3} a_1 a_2 \sigma_T + 2 \left(\frac{\sigma_1}{a_1^2 + w^2} + \frac{\sigma_2}{a_2^2 + w^2} \right) \cdot \xi,$$

$$\frac{2}{3} a_1 a_2 \sigma_T = \frac{2\sigma_1}{a_1^2 + w^2} \cdot \xi,$$

$$\frac{2}{3} a_1 a_2 \sigma_T = \frac{2\sigma_2}{a_2^2 + w^2} \cdot \xi,$$

$$\xi = w\delta \sqrt{a_1^2 w^2 + a_2^2 w^2 + a_1^2 a_2^2},$$

где δ - толщина обшивки,

$$\sigma_i = Q_{ij} \varepsilon_j, \quad i, j=1,2, \quad (3)$$

Q_{ij} - компоненты матрицы жесткости материала обшивки, которые определяются по классической теории слоистых пластин.

Решая систему уравнений (2) с учетом выражений (1) и (3), получим выражение, описывающее диаграмму контактного деформирования

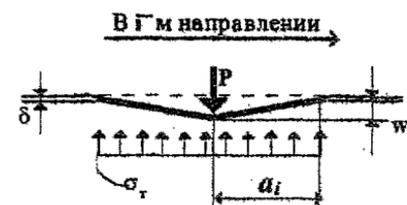


Рис. 6. Расчетная схема искривленной части обшивки

$$P = 2,45 \sqrt{\sigma_T} \delta \left(\sqrt{Q_{11} Q_{22}} + Q_{12} \right)^{1/2} w^{1,5} \quad (4)$$

и выражения для определения размеров вмятины

$$a_1 = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T (Q_{22}/Q_{11})^{1/4}}}, \quad a_2 = a_1 4 \sqrt{\frac{Q_{22}}{Q_{11}}}. \quad (5)$$

Расчетные диаграммы контактного деформирования по формуле (4) показаны на рис. 7 сплошной линией (ССП: $\sigma_T=1,0$ МПа; ПСП: $\sigma_T=0,7$ МПа; АМГ-2Н: $\sigma_T=1,0$ МПа; ОП: $E_1=28$ ГПа, $E_2=24$ ГПа, $G=2$ ГПа, $\nu_1=0,1$; УП: $E_1=120$ ГПа, $E_2=67$ ГПа, $G=3$ ГПа, $\nu_1=0,3$).

Аналитически получено, что диаграмма контактного деформирования имеет степенной характер и описывается выражением $P = kw^{1,5}$, где k - константа обшивки, которая зависит от свойств материала обшивки и заполнителя. Аппроксимация экспериментальных диаграмм контактного деформирования показала аналогичную зависимость с степенью 1,4...1,6.

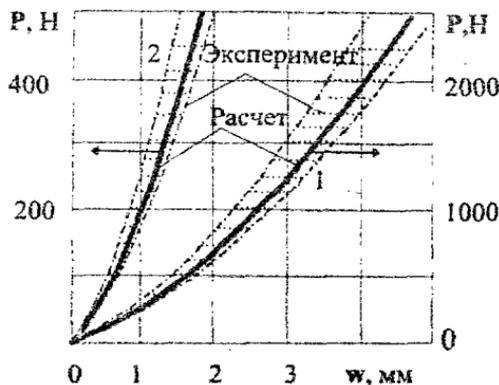


Рис. 7. Диаграммы контактного деформирования:

- 1 - обшивка: ОП [0], заполнитель: ССП;
 2 - обшивка: УП [$\pm 45/0$], заполнит.: АМг-2Н

рассматривается зона контакта обшивки с индентором. Эта модель основана на следующих допущениях.

- Зона контакта аппроксимирована эллипсом.

- Прочностью и жесткостью матрицы в обшивке пренебрегаем и считаем, что усилие со стороны индентора воспринимают только нити (нитяная модель), так как в обшивке прочность матрицы намного меньше прочности волокон. Поэтому в зоне контакта к моменту прорыва обшивки она практически разрушена.

Каждая система нитей (т.е. набор идентичных одинаково направленных нитей) работает независимо от других, т.е. трение между системами отсутствует.

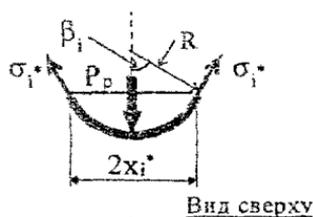
- При взаимодействии каждой системы нитей со сферическим индентором все нити в зоне контакта нагружены одинаково и разрушаются одновременно.

Расчетная схема показана на рис. 8. Из условия предельного равновесия обшивки в месте контакта ее с индентором, получим

$$P_p = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (6)$$

МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ОБШИВКИ

Упругое деформирование обшивки под индентором, рассмотренное в предыдущей части, заканчивается ее прорывом (на рис. 3 точка А). Рассмотрим модель для оценки нагрузки прорыва тонкой обшивки из армированного волокнами пластика сетовой панели при квазистатическом воздействии сферическим индентором. В ней рассматривается



Вид сверху

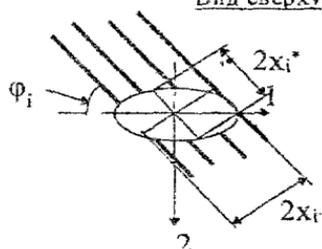


Рис. 8. Расчетная схема обшивки в зоне контакта

угол φ_i показан на рис. 8.

Отсюда, с учетом выражений (4), (5) получим

$$P_p = \frac{30,2 \sqrt{\sigma_T} t R^{1,5}}{\sqrt{Q_{11} Q_{22} + Q_{12}}} \left[\sum_{i=1}^n \sigma_i \psi_i \sqrt{A_i B_i} \right]^{1,5},$$

$$A_i = \cos^2 \varphi_i + \sqrt{Q_{11}/Q_{22}} \sin^2 \varphi_i, \quad (10)$$

$$B_i = \cos^2 \varphi_i + \sqrt{Q_{22}/Q_{11}} \sin^2 \varphi_i.$$

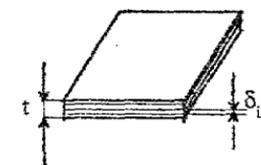


Рис. 9. Схема обшивки

деформаций разбит на m участков.

Нагружение считается кинематическим (задаются деформации) и разбивается на m шагов.

1. Деформацию в i -й системе нитей на k -м участке определяем из модели деформирования с привлечением допущений нитяной модели: $\varepsilon_{i,k} = \varepsilon_i^{(k)} A_i$.

$$P_i = 4 \sigma_i^* \delta \psi_i \beta_i x_i,$$

$$\beta_i = 2w \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi_i}{a_1^2} + \frac{\sin^2 \varphi_i}{a_2^2}}, \quad (7)$$

n - количество систем нитей, ψ_i - относительная толщина i -й системы (рис. 9),

$$\psi_i = \frac{\delta_i}{t}, \quad (8)$$

σ_i^* - напряжение в i -й системе в момент разрушения обшивки, x_i - размер зоны контакта, определяемый из выражения

$$x_i = 2Rw \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi_i}{a_1^2} + \frac{\cos^2 \varphi_i}{a_2^2}}, \quad (9)$$

2. Напряжение в i -й системе: $\sigma_{i,k} = E_f \cdot \epsilon_{i,k}$, где E_f - модуль упругости нити.

3. Если $\sigma_{i,k} > F_i V$ тогда напряжение $\sigma_{i,k}$ равно нулю (F_i - предел прочности нити, V - объемная доля волокон).

4. Далее следует переход к новому шагу нагружения.

Нагрузка, соответствующая прорыву обшивки, определяется по следующему уравнению:

$$P_p = \frac{30,2 \sqrt{\sigma_{Tf}} \cdot R^{1,5}}{\sqrt{Q_{11}Q_{22} + Q_{12}}} \frac{\max}{k} \left[\sum_{i=1}^n \sigma_{i,k} \psi_i \sqrt{A_i B_i} \right]^{1,5}. \quad (11)$$

Предел прочности нити зависит от длины образца, то есть от базы испытаний, поэтому необходимо проводить испытания на нескольких базах с последующей экстраполяцией на длину нити, равной размеру зоны контакта. В данной работе прочность нити определена по испытаниям на трех базах (на каждой базе испытано по 30...40 нитей) (рис. 10).

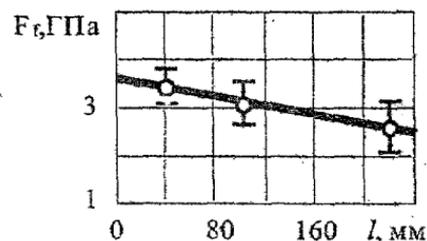


Рис. 10. Зависимость прочности нити СВМ от базы испытаний

Сопоставление результатов расчета нагрузок прорыва обшивки сотовой панели и экспериментальных данных представлено на рис. 11. В расчете учтены разброс прочностных свойств нити и заполнителя, разброс упругих свойств материала

обшивки, а также угол отклонения уточной нити от заданного направления (на рис. 11 заштрихованные области). Экспериментально установлено, что угол отклонения уточной нити от заданного направления для органопластика на основе тканей СВМ сатинового переплетения можно описать нормальным законом распределения с параметрами ($1^{\circ}40'$, 1,97). Максимальная погрешность в определении нагрузок прорыва обшивок P_p составила 15% для радиусов индентора 5...15 мм и 50% для $R = 2...5$ мм.

На основе анализа микромеханики (укладки волокон в волокнистом композите), показано слабое влияние параметров технологического процесса изготовления сотовых панелей, влияющих на объемную долю волокон (температура и давление

прессования), на диаграмму деформирования и нагрузку прорыва обшивки при локальном контактировании воздействием индентором со сферическим основанием.

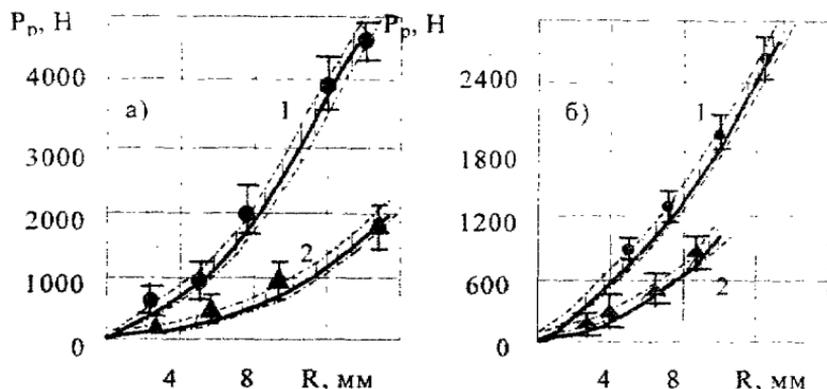


Рис. 11. Зависимость нагрузки прорыва обшивки от радиуса индентора:

- а) 1 - обшивка ОП [± 45]_с, наполнитель ССП;
 2 - обшивка УП [± 45]_с, наполнитель ПСП;
 б) 1 - обшивка углеорганопластик [$(\pm 45^0)_s/0^0$]_с, наполнитель ССП;
 2 - обшивка УП [$\pm 45/0$]_т, наполнитель АМГ-2Н

Длину прорыва обшивки можно вычислить исходя из представленной модели разрушения обшивки сотовой панели по следующему выражению:

$$2l = k \frac{P_p^{1/6} \sigma_T^{1/6} \left(\frac{Q_{11}}{Q_{22}} \right)^{1/8} R}{\sqrt[3]{\delta(\sqrt{Q_{11}Q_{22}} + Q_{12})}} \quad (12)$$

где k - расчетный коэффициент, зависящий от энергии удара, материала обшивки (его определение подробно описано в диссертации).

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ОБШИВКИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Учет особенностей реальных дефектов (расслоения, вмятины, прорывы обшивки) в расчетах на прочность обшивки представляет собой сложную задачу. Поэтому в данной работе использовали традиционный подход: заменяли реальный дефект острым надрезом с длиной равной длине прорыва (формула (11)), ориентированной перпендикулярно направлению растягивающего напряжения в обшивке.

Эксперименты, проведенные в работе, показали, что дефекты без прорыва обшивки снижают прочность последней на 5...10%, а дефекты с прорывом обшивки - на 40...60%.

Экспериментально показано, что прочность обшивки с дефектом отличается от прочности аналогичной обшивки с острым надрезом, имитирующем трещину, длиной, равной максимальной длине прорыва обшивки и расположенной перпендикулярно направлению нагружения не более чем на 10%. Такая замена позволяет использовать для оценки остаточной прочности известные модели механики разрушения композитов.

Оценка прочности композитов на растягиваемых образцах с центральным острым надрезом проведена с помощью двух моделей.

1. Двухпараметрическая модель, предложенная Б. Каминским с соавторами. Эта модель основана на экспериментальном определении некоторой величины "а", называемой зоной растрескивания материала около надреза, на базе которой усредняются напряжения. Модель применима, если длина надреза хотя бы в 3 раза больше величины а. Основные зависимости этой модели представлены ниже:

$$\frac{\sigma_c}{F_{\text{ж}}} = \sqrt{\frac{a \cdot \cos(\pi l/B)}{1+a}}, \quad a = \left[\left(\frac{F_{\text{ж}}}{\sigma_c f} \right)^2 - 1 \right]^{-1}, \quad f = \sqrt{\frac{1}{\cos(\pi l/B)}}$$

где $F_{\text{ж}}$ - предел прочности на растяжение композита в направлении нагружения, σ_c - напряжение разрушения образца с надрезом, $2l$ - исходная длина образца, B - ширина образца.

2. Расчетная модель, разработанная С.Б.Сапожниковым. Модель основана на исследовании кинетики деформирования и разрушения элементов композитных конструкций, которая базируется на решении методом конечных элементов плоской задачи теории упругости. Компоненты матрицы жесткости треугольных конечных элементов корректируются в зависимости от типа и уровня микрповреждений в слоях в соответствии с использованной моделью монослоя как набора параллельно работающих ячеек.

Максимальная погрешность в определении нагрузок разрушения образцов по второй модели составила 10%.

Исследованные материалы обшивок сотовых панелей (ОП [0/90] и УП [±45]) при наличии прорыва обшивки длиной свыше 4 мм (ОП) и 2 мм (УП) будут снижать свою прочность более, чем в 1,5 раза, определенной основным коэффициентом запаса

по Единым нормам Летной Годности Самолетов для силовых конструкций агрегатов планера. Это соответствует энергиям удара гравием фракции 10...20 мм равными 4 и 0.6 Дж, соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана модель деформирования сосредоточенной силой тонкой ортотропной обшивки трехслойной панели с сотовым наполнителем, которая позволила получить зависимость прогиба обшивки w от величины контактного усилия P (диаграммы контактного деформирования) и определить размеры искривленной части обшивки. Получено, что данная зависимость имеет степенной характер $P = kw^{1.5}$, где k - константа обшивки, зависящая от свойств материала обшивки и наполнителя. Аппроксимация экспериментальных диаграмм контактного деформирования показала аналогичную зависимость с степенью 1,4...1.6.

2. Разработана модель, описывающая разрушение тонкой обшивки трехслойной сотовой панели, состоящей из слоистого армированного волокнами пластика. Эта модель позволяет определить максимальную нагрузку, которую может выдержать обшивка при контактном деформировании индентором со сферическим основанием, и длину трещины прорыва.

3. В расчетах проведен учет внутримаршевого разброса параметров панели а также отклонение угла укладки уточной нити от заданного направления. Теоретически, на основе анализа микромеханики волокнистых композитов, обосновано слабое влияние технологического процесса изготовления сотовых панелей на диаграмму деформирования и нагрузку прорыва обшивки при локальном контактном воздействии индентором со сферическим основанием. Выявлены основные параметры, влияющие на рассеяние нагрузки прорыва обшивки. Найденные расчетные нагрузки прорыва обшивок при контактном деформировании сферическим индентором удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Максимальная погрешность в определении нагрузок прорыва обшивки для инденторов с радиусами 5...15 мм составила 15%, для инденторов с радиусом 2...5 мм - 50%.

4. Экспериментально обоснована возможность применения теории Герпа для оценки динамических характеристик ударного воздействия (продолжительность удара, максимальное контактное усилие, величины прогиба и т.д.) на трехслойные панели с сотовым наполнителем и тонкими обшивками из армированных пластиков с использованием квазистатических диаграмм контактного деформирования.

Экспериментально показана идентичность диаграмм контактного деформирования, характера и размеров, возникающих при этом дефектов. Максимальное отличие в нагрузках, соответствующих прорыву обшивки, при динамическом и квазистатическом воздействии составляет 15% для панелей с обшивками из углепластика КМУ-4У и заполнителями из ССП, ПСП и алюминиевой фольги АМг-2Н.

5. Установлено, что диаграмма контактного деформирования сотовых панелей практически не зависит от формы и размера индентора вплоть до прорыва обшивки.

6. Экспериментально обоснована замена реального индентора - камня фракции 10...20 мм на сферический индентор с диаметром 8...16 мм (с вероятностью 0,90) при исследовании трехслойных панелей при контактном деформировании. При этом нижняя граница нагрузок прорыва обшивки при воздействии камнем соответствует нагрузкам прорыва при воздействии сферическим индентором диаметром 8 мм.

7. На основе экспериментальных данных, полученных в настоящей работе, показано, что реальный дефект типа вмятины с прорывом обшивки можно заменить на острый надрез, имитирующий трещину, расположенный перпендикулярно направлению нагружения с длиной, равной максимальной длине прорыва обшивки. В этом случае различие в остаточных прочностях не превышает 10%.

8. Предложен расчетный способ определения длины острого надреза для определения остаточной прочности обшивки, который базируется на разработанной в диссертации модели разрушения тонкой обшивки из армированных волокнами пластиков сотовой панели при контактном деформировании индентором со сферическим основанием. При этом максимальная ошибка в определении длины надреза составила 15%.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ

1. Сапожников С.Б., Буслаева О.С. Расчетная оценка нагрузок разрушения элементов конструкций из слоистых композиционных материалов с концентратором напряжений// Технология. Сер.: Конструкции из композиционных материалов. - 1993. - № 1. - С. 9-15.

2. Буслаева О.С., Сапожников С.Б. Экспериментальное и расчетное исследование деформирования и разрушения трехслойных композитных панелей при низкоскоростном ударе// Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузениях: Тематический сб. науч. трудов. - Челябинск: ЧГТУ, 1994. - С. 71-77.

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

4. Сапожников С.Б., Буслаева О.С. Оценка повреждений и остаточной прочности обшивки трехслойной пластины с сотовым наполнителем при ударе сферическим индентором: Тезисы докладов// III Российская школа по проблемам проектирования неоднородных конструкций. - Миасс, 20-22 июня, 1995.

5. Сапожников С.Б., Буслаева О.С. Расчетная оценка повреждения обшивки трехслойной пластины с сотовым наполнителем при локальном воздействии сферическим индентором: Тезисы докладов// Научно-техническая конференция "Расчетные методы механики деформируемого твердого тела". - Новосибирск: СГАПС. 11-14 сентября, 1995.

6. Буслаева О.С. Оценка повреждения в обшивках трехслойных композитных панелей при низкоскоростном ударе: Тезисы научной конференции// Молодежная научная конференция "XXI Гагаринские чтения". - Москва, 4-8 апреля, 1995. - Часть 4. - С. 44.

7. Sapozhnikov S.B. and Buslaeva O.C. 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.

Буслаева —

Издательство Челябинского
государственного технического университета

ЛР № 020364 от 20.01.92. Подписано в печать 11.10.96. Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ. л.0,93. Уч.-изд. л. 1.
Тираж 100 экз.. Заказ 228/521.

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