

На правах рукописи



Хомченко Антон Васильевич

**Численное моделирование поведения слоистых элементов
конструкций из полимерных композиционных материалов при
наличии внутренних дефектов под действием динамических нагрузок**

Специальность 1.1.8. – Механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Медведский Александр Леонидович**,
доктор физико-математических наук, доцент

**Официальные
оппоненты:** **Константинов Александр Юрьевич**, доктор
физико-математических наук, профессор
кафедры теоретической, компьютерной и
экспериментальной механики Института
информационных технологий, математики и
механики «ННГУ им. Н.И. Лобачевского».

Говорун Максим Викторович, кандидат
технических наук, доцент, начальник отдела
общей прочности ПАО «Ил».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет им Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)», г. Москва.

Защита состоится «14» февраля 2024 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета 24.2.327.07 при ФГБОУ ВО «МАИ» по адресу:
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО
«Московский авиационный институт» (национальный исследовательский
университет) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. и на
сайте: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=176822

Телефон для справок: +7 (499) 158-48-29

Автореферат разослан «____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.237.07
к.т.н., доцент



Д.О. Сердюк

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Опыт создания и эксплуатации авиационной техники показывает, что внутренние дефекты в элементах конструкций из композитов оказывают существенное влияние на прочность и несущую способность конструкции в целом. Анализ опубликованных материалов показывает, что практически не рассматривается влияние внутренних дефектов на поведение элементов конструкций при действии динамических нагрузок различного характера, например, действие нестационарных полей давления, кратковременных ударных нагрузок и т.д. Таким образом, актуальной является задача разработки численно-экспериментального метода оценки влияния внутренних дефектов на поведение элементов авиационных конструкций, изготовленных из слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) при действии динамических нагрузок различного характера.

Целью диссертационной работы является разработка метода моделирования и численного расчёта тонкостенных элементов авиационных конструкций, выполненных из слоистых полимерных композиционных материалов при наличии в последних внутренних дефектов типа расслоений при действии динамических нагрузок различного характера.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка метода моделирования тонкостенных элементов конструкций, выполненных из слоистых композитов при наличии внутренних дефектов типа расслоений произвольной формы, размеров и расположений.

2. Разработка метода расчета собственных форм и частот колебаний слоистых элементов конструкций при наличии расслоений, а также определении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) указанных конструкций при гармоническом воздействии.

3. Разработка метода расчёта несущих свойств тонкостенных конструкций с дефектами, в том числе, с учётом динамики развития дефектов по различным критериям разрушения для композитных материалов при действии нестационарных (не ударных) нагрузок.

4. Разработка метода определения динамики развития расслоений в результате ударного воздействия со скоростями ударника, не превышающими 10 м/с.

5. Валидация метода определения динамики развития дефектов в слоистых тонкостенных элементах конструкций по результатам натурного эксперимента на примере однопролётной трёхстринергой панели при ударном воздействии.

Научная новизна:

1. Решен новый класс задач динамического поведения элементов авиационных конструкций, изготовленных из слоистых композиционных материалов при наличии внутренних дефектов типа расслоений

произвольной формы, размеров и расположений.

2. Построена математическая модель нестационарного деформирования, повреждения и разрушения слоистого ПКМ с дефектами при действии динамических нагрузок.

3. Разработан метод расчёта собственных форм и частот колебаний, а также определения АЧХ тонкостенных элементов конструкций из ПКМ при наличии дефектов.

4. Разработан метод расчёта несущих свойств элементов конструкций из ПКМ при наличии дефектов с учётом динамики развития дефектов в случае нестационарных воздействий.

5. Проведён анализ влияния дефектов различных форм, размеров и расположения на поведение тонкостенных элементов конструкций из ПКМ.

6. Проведена валидация метода расчёта динамики развития дефектов на примере однопролётной трёхстринергой панели при ударном воздействии.

Методы исследования. В диссертации используется метод конечных элементов, методы теории упругости, методы теории слоистых пластин и оболочек, методы экспериментальных исследований слоистых композиционных материалов, математические модели механики деформируемого твёрдого тела, методы механики разрушения композиционных материалов, методы теории удара, критерии прочности при сложных режимах нагружения.

Теоретическая значимость работы определяется развитием подходов к моделированию динамического поведения многослойных тонкостенных оболочек при наличии межслоевых дефектов с учетом их развития в процессе деформирования.

Практическая значимость диссертации: заключается в использовании численно-экспериментального метода оценки влияния внутренних дефектов типа расслоений на поведение слоистых элементов конструкции из композиционных материалов при действии динамических нагрузок различного характера на этапах проектирования, разработки, сертификации и эксплуатации летательных аппаратов.

На защиту выносятся следующие положения диссертации:

1. Математическая модель деформирования, повреждения и разрушения элементов тонкостенных конструкций из ПКМ при нестационарных воздействиях в случае наличия множественных дефектов.

2. Метод численного расчёта собственных форм и частот колебаний, АЧХ тонкостенных элементов конструкций из ПКМ при наличии дефектов.

3. Метод численного расчёта несущих свойств тонкостенных элементов конструкций из ПКМ при наличии дефектов различной конфигурации с учётом их развития при динамических нагрузках.

4. Метод определения динамики развития межслоевых дефектов в элементах тонкостенных конструкций из ПКМ в результате ударного воздействия со скоростями, не превышающими 10 м/с.

5. Валидация метода определения динамики развития дефектов в

слоистых тонкостенных элементах конструкций по результатам испытаний подкреплённой панели при ударном воздействии.

Достоверность результатов и выводов в работе обеспечивается корректностью постановки задачи, применением методов механики деформируемого твердого тела и механики разрушения, верификацией методов расчёта, а также сравнением расчётов с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на следующих конференциях:

XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX Международных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», 2018 г, 2019 г, 2020 г, 2021 г, 2022 г, 2023 г, Ярополец – Вятчи.

VIII, IX, X, XI Всероссийских научных конференциях «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского» 2018 г, 2019 г, 2020 г, 2021 г, Москва.

Научных конференциях «Ломоносовские чтения», 2019 г, 2020 г, 2021 г, Москва.

XXI, XXII Международных конференциях по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, 2019 г, 2021 г, Алушта.

Международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии», 2019 г, Брест.

XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 2019 г, Уфа.

LXI, LXII, LXIII Международных конференциях «Актуальные проблемы прочности», 2019 г, Тольятти, 2020 г, Витебск, 2021 г, Тольятти.

XIII, XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли, 2020 г, 2022 г, Алушта.

6-ой, 7-ой 6-ая Открытая Всероссийская конференциях по аэроакустике, 2019 г, 2021 г, Звенигород.

18-ой, 19-ой Международных конференциях «Авиация и космонавтика», 2019 г, 2020 г, Москва.

IX, X, XI, XII Международных научно-практических конференциях «Проблемы безопасности на транспорте», 2019 г, 2020 г, 2021 г, 2022 г, Витебск.

63-ей, 64-ой Всероссийской научной конференции МФТИ. Аэрокосмические технологии, 2020 г, 2021 г, Москва.

X Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур», 2020 г, Москва.

Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов», 2022 г. Новосибирск.

XIII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 2023 г, Санкт-Петербург.

XX Научно-технической конференции по аэроакустике, 2023 г, Суздаль.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 57 печатных работах, из них 12 статей в журналах из перечня, рекомендуемого ВАК РФ, 3 статьи из перечня SCOPUS.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения. Общий объем составляет 142 страницы, 83 рисунка и 14 таблиц. Список используемой литературы содержит 145 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведена постановка задач и краткая аннотация содержания работы по разделам, дана оценка научной новизны и практической значимости полученных результатов и представлены методы исследования в диссертации.

В первой главе в параграфе 1.1. проведён обзор современного состояния проблемы влияния внутренних дефектов типа расслоений на поведение элементов конструкций их слоистых композиционных материалов. Показано, что основной вклад в развитие механики композитов внесли такие учёные как Б.Д. Аннин, В.В. Болотин, Л. Браутман, Г.А. Ванин, В.В. Васильев, Э.И. Григолюк, П.А. Зиновьев, В.Д. Протасов, Ю.Н. Работнов, В.П. Тамуж, Ю.М. Тарнопольский, Н. Пейгано, Б.Е. Победря, А.М. Timonin. Проанализированы работы, посвящённые современным численным и экспериментальным методам моделирования и расчёта слоистых композитов с возможностью прогнозирования их разрушения и развития внутренних дефектов типа расслоений. Сделан вывод, что в работах, посвящённых влиянию межслоевых дефектов в изделиях из ПКМ, исследуется действие статических или квазистатических нагрузок. Математические модели и методы расчёта прочности элементов конструкции из ПКМ при наличии внутренних дефектов в виде нарушения сплошности соединения отдельных слоёв при действии динамических нагрузок в настоящее время разработаны недостаточно.

В параграфе 1.2 дана постановка задачи, в рамках которой рассмотрены следующие тонкостенные элементы конструкций, изготовленные из слоистых композиционных материалов, имеющих межслоевые дефекты:

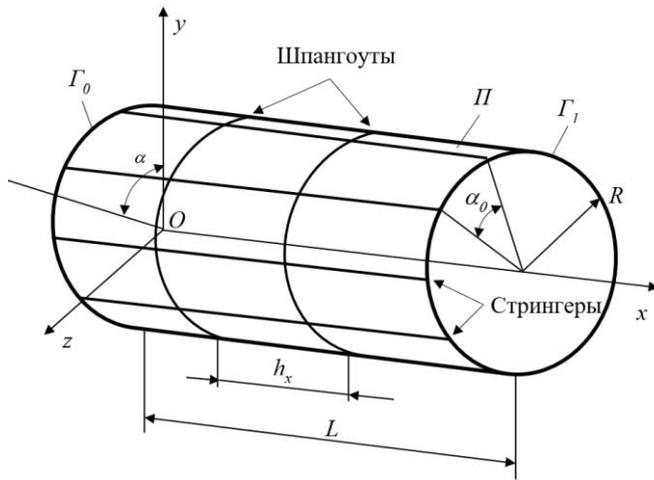


Рис. 1 - Подкреплённая цилиндрическая оболочка

Цилиндрическая оболочка Π , имеющая равномерный продольный и поперечный подкрепляющий набор (рис. 1). В частном случае рассмотрена гладкая цилиндрическая оболочка без подкрепления. Оболочка характеризуется радиусом средней поверхности R , длиной L , толщиной обшивки t , шагом поперечного набора $h_x = L / (m - 1)$, шагом продольного набора $h_\alpha = 2\pi / n$,

n - количество стрингеров, m - количество шпангоутов.

Поверхность Π задаётся в параметрическом виде:

$$\Pi: \mathbf{r} = \mathbf{r}(x, \alpha) = \varphi(x, \alpha)\mathbf{e}_x + \psi(x, \alpha)\mathbf{e}_y + \chi(x, \alpha)\mathbf{e}_z,$$

$$\varphi(x, \alpha) = x, \psi(x, \alpha) = R \cos \alpha, \chi(x, \alpha) = R \sin \alpha, \alpha \in [0; 2\pi], x \in [0; L]. \quad (1)$$

В качестве подкрепляющих наборов используются криволинейные стержни (стрингеры $L_i^{(\alpha)}$ и шпангоуты $L_i^{(x)}$), оси которых определяются так:

$$H_\alpha = \bigcup_i^n L_i^{(\alpha)}, L_i^{(\alpha)}: \mathbf{r}_i^{(\alpha)} = \mathbf{r}^{(\alpha)}(\vartheta) = x_i^{(\alpha)}(\vartheta)\mathbf{e}_x + y_i^{(\alpha)}(\vartheta)\mathbf{e}_y + z_i^{(\alpha)}(\vartheta)\mathbf{e}_z, \quad (2)$$

$$x_i^{(\alpha)}(\vartheta) = \vartheta = x, y_i^{(\alpha)}(\vartheta) = (R - \Delta x) \cos i h_\alpha, z_i^{(\alpha)}(\vartheta) = (R - \Delta x) \sin i h_\alpha.$$

$$H_x = \bigcup_i^m L_i^{(x)}, L_i^{(x)}: \mathbf{r}_i^{(x)} = \mathbf{r}^{(x)}(\vartheta) = x_i^{(x)}(\vartheta)\mathbf{e}_x + y_i^{(x)}(\vartheta)\mathbf{e}_y + z_i^{(x)}(\vartheta)\mathbf{e}_z, \quad (3)$$

$$x_i^{(x)}(\vartheta) = (i - 1)h_x, y_i^{(x)}(\alpha) = (R - \Delta\alpha) \cos \alpha, z_i^{(x)}(\alpha) = (R - \Delta\alpha) \sin \alpha.$$

Здесь $\Delta x, \Delta\alpha$ - смещение осей подкрепляющих элементов относительно средней поверхности; $x \in [0; L], \alpha \in [0; 2\pi]$. В работе также рассматривается гладкая цилиндрическая оболочка без подкрепления, что соответствует частным случаям соотношений (2) и (3): $H_\alpha = H_x = \emptyset$.

1) Подкреплённая цилиндрическая панель, характеризующаяся центральным углом α_0 , и имеющая геометрические параметры, соответствующие цилиндрической оболочке. В этом случае поверхность Π соответствующая панели также описывается соотношениями вида (2) – (3) в которых необходимо положить $\alpha \in [0; \alpha_0]$, $H_\alpha = 2\pi / (n - 1)$. При этом предполагается, что продольный набор присутствует на границе панели. Также в качестве частного случая рассматривается гладкая панель ($H_\alpha = H_x = \emptyset$).

2) Прямоугольная пластина Π , шириной a , длиной L и толщиной

t , подкреплённая продольным набором H_x . Параметризация Π соответствует соотношениям (2)-(3), в которых надо положить: $\varphi(x, y) = x$, $\psi(x, y) = y$, $\chi(x, y) = 0$, $y \in [0; a]$, $x \in [0; L]$, $H_\alpha = a / (n - 1)$, $x_i^{(\alpha)}(\vartheta) = \vartheta = x$, $y_i^{(\alpha)} = (i - 1)h_\alpha$, $z_i^{(\alpha)} = -\Delta\alpha$. Также в качестве частного случая рассмотрена прямоугольная пластина без подкреплений ($H_\alpha = \emptyset$).

Для описания движения оболочки используются уравнения движения, которые соответствуют модели С.П. Тимошенко:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} + P_x - \rho \left[(t + \bar{F}) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + \bar{S} \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial \tau^2} \right] = 0; \\
& \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + P_y - \rho \left[(t + \bar{F}) \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + \bar{S} \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial \tau^2} \right] = 0; \\
& N_x K_x + N_y K_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial w}{\partial x} + N_{xy} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial w}{\partial y} + N_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \\
& \quad + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q - \rho(t + \bar{F}) \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} = 0; \\
& \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x - \rho \left[\bar{S} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \tau^2} + \left(\frac{t^3}{12} + \bar{J} \right) \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial \tau^2} \right] = 0; \\
& \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - Q_y - \rho \left[\bar{S} \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \tau^2} + \left(\frac{t^3}{12} + \bar{J} \right) \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial \tau^2} \right] = 0;
\end{aligned} \tag{4}$$

где u, v, w - компоненты вектора перемещений точек вдоль осей x, y, z соответственно; $\bar{F}, \bar{S}, \bar{J}$ - площади поперечного (продольного) сечения подкрепляющего элемента, приходящееся на единицу длины сечения, статический момент и момент инерции сечения соответственно; $N_x, N_y, Q_x, Q_y, M_x, M_y, M_{xy}$ - погонные усилия, перерезывающие силы и моменты; ρ - плотность материала; τ - время; ψ_x, ψ_y - углы поворота нормали в плоскостях xOz, yOz ; K_x, K_y - главные кривизны; P_x, P_y, q - действующие нагрузки. Далее будем предполагать, что оболочка состоит из n слоёв, с толщиной i - го слоя δ_i . При этом $n \in N$, $\sum_{i=1}^n \delta_i = t$. Будем предполагать, что заданная выше поверхность Π является срединной поверхностью оболочки. На рис. 2 приведена используемая далее нумерация

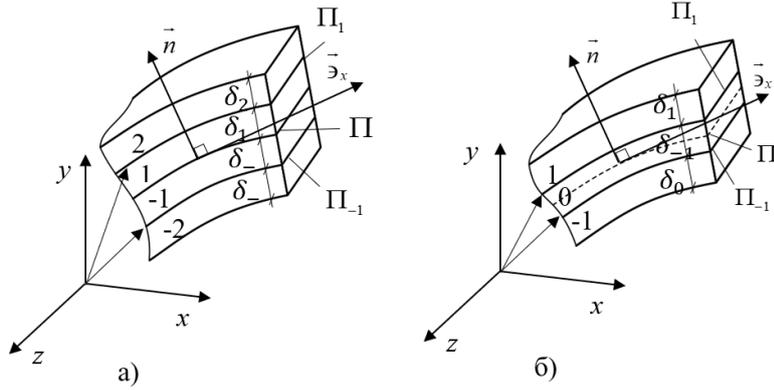


Рис. 2 – Нумерация слоёв оболочки

слоёв в случае, когда n - чётное (рис. 2а) и n - нечётное (рис. 2б).

Эквидистантная поверхность оболочки Π_i , соответствующая контактной поверхности i -го слоя и $i+1$ -го слоёв задаётся в параметрическом виде.

$$\Pi_i : \mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i(x, \alpha) = \mathbf{r}(x, \alpha) + z_i \mathbf{n}(x, \alpha), z_i \in \left(-\frac{1}{2}; \frac{1}{2}\right) \quad (5)$$

Здесь \vec{n} - единичный вектор нормали к поверхности Π_i определяется так:

$$\mathbf{n} = \frac{[\partial_x \times \partial_\alpha]}{\|[\partial_x \times \partial_\alpha]\|}, \partial_x = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial x}, \partial_\alpha = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \alpha} \quad (6)$$

Параметр z_i входит в соотношение 1.2.6 и определяется в зависимости от чётности количества слоёв следующим образом:

$$z_i = \text{sign}(i) \sum_{k=\text{sign}(i)}^i \delta_k, i \in z, i \in \left[-\frac{u}{2} + 1; -\frac{u}{2} - 1\right], n - \text{чёт.} \quad (7)$$

$$z_i = \text{sign}(i) \left[\frac{\delta_0}{2} + \sum_{k=\text{sign}(i)}^{i-\text{sign}(i)} \delta_k \right], i \in z, i \in \left[\frac{-u+1}{2}; \frac{u-1}{2}\right], n - \text{нечёт.} \quad (8)$$

В качестве дефектов в работе рассмотрены межслоевые расслоения, имеющие достаточно произвольную форму. Рассмотрим межслоевое расслоение, возникающее на эквидистантной поверхности Π_i между i -м и $i+1$ -м слоями. Предположим, что область дефекта D_i ограничена

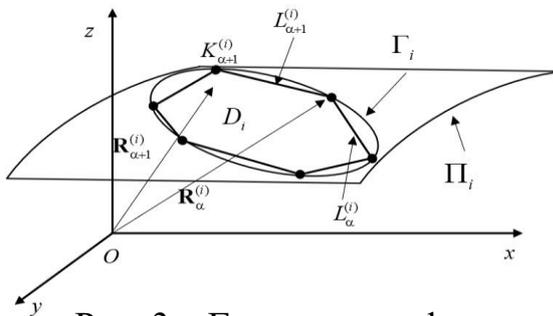


Рис. 3 – Геометрия дефектов произвольной формы

кривой $\Gamma_i \in \Pi_i$ (рис. 3). В дальнейшем для аппроксимации кривой Γ_i будем использовать линейную аппроксимацию. В этом случае в глобальной системе координат $Oxuz$ задаётся набор N узлов $K_j^{(i)}(x^j, y^j, z^j)$, $j=1, \dots, N$, а область дефекта D_i ограничена прямыми $L_j^{(i)}(j=1, \dots, N-1)$. Для узла $k_j^{(i)}$ введём радиус-вектор $\mathbf{R}_j^{(i)}$. Тогда

граница Γ_i области D_i представляется следующим образом:

$$\Gamma = \partial D_i = \bigcup_{j=1}^{N-1} L_j^{(i)}, L_j^{(i)} = (\alpha - 1)\mathbf{R}_j^{(i)} + \alpha\mathbf{R}_{j+1}^{(i)}, \alpha \in [0, 1] \quad (9)$$

В качестве нагрузок рассмотрены:

1. Стационарные воздействия поля давления, действующие на тонкостенную конструкцию: $\mathbf{p}(x, y, z) = -p_0(x, y, z)e^{i\omega t} \cdot \mathbf{n}$, где $p_0(x, y, z)$ – амплитуда, ω – циклическая частота, \mathbf{n} – внешняя нормаль к срединной поверхности оболочки.

2. Нестационарные воздействия, действующие на тонкостенную конструкцию в виде полей давления: $\mathbf{p}(x, y, z) = -p_0(x, y, z)F(\tau) \cdot \mathbf{n}$, где p_0 характеризует пространственное распределение давления по поверхности оболочки, $F(t)$ – зависимость давления от времени.

Также в работе рассмотрено воздействие взрывной волны, для которой временная зависимость функции $F(t)$ имеет следующий вид:

$$p(t) = p_{\max} \left[1 - \frac{\tau - T_a}{T_0} \right] \exp \left[\frac{-A \times (\tau - T_a)}{T_0} \right], \quad (10)$$

где p_{\max} – максимальное действующее давление, T_0 – продолжительной положительной фазы, A – коэффициент затухания, T_a – время прибытия волны.

3. Действие ударников

В качестве ударников рассмотрены следующие типы инденторов:

1. Абсолютно твёрдый ударник (рис. 4), движение которого имеет следующий вид:

$$m_u \ddot{u}_c(\tau) = P(\tau) = \iint_{\Omega(\tau)} p(\xi, \zeta, \tau) d\xi d\zeta, u_c(0) = 0, \dot{u}_c(0) = V_0 \quad (11)$$

где m_u – масса ударника, u_c – перемещение центра масс ударника, P – результирующая контактного давления p , $\Omega(\tau)$ – область контакт, граница которой зависит от времени, τ – время, V_0 – начальная скорость ударника.

Условия контакта ударника и оболочки имеют вид:

$$f(z, x) + u_c(\tau) = w(\alpha, x, \tau), p(\alpha, x, \tau) < 0, z, x \in \Omega(\tau), y = \sin \alpha \quad (12)$$

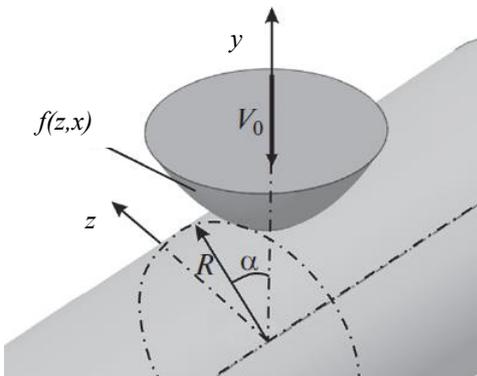


Рис. 4 – Положение ударника относительно оболочки

где $f(z, x) + u_c(\tau)$ – положение поверхности, ограничивающей ударник в текущий момент времени. В начальный момент времени оболочка находится в недеформированном состоянии, что соответствует нулевым начальным условиям:

$$\begin{aligned} u|_{\tau=0} = v|_{\tau=0} = w|_{\tau=0} = \chi_1|_{\tau=0} = \chi_2|_{\tau=0} = \chi_{12}|_{\tau=0} = 0, \\ \dot{u}|_{\tau=0} = \dot{v}|_{\tau=0} = \dot{w}|_{\tau=0} = \dot{\chi}_1|_{\tau=0} = \dot{\chi}_2|_{\tau=0} = \dot{\chi}_{12}|_{\tau=0} = 0; \end{aligned} \quad (13)$$

2. Ударник, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда, изготовленного из гиперупругого материала (резины), описываемой моделью Огдена.

3. Шарообразные ударники, моделирующие град. Для описания используется упруго-пластическая модель материала.

Предполагается, что слои оболочки изготовлены из ортотропного материала, при этом расчёт приведенных характеристик монослоя произведён на основе классической теории ламинатов.

В параграфе 1.3 приведены основные положения метода конечных элементов (МКЭ), применительно к классам решаемых задач. **Параграф 1.4** посвящён описанию используемых конечных элементов, используемых в диссертационной работе. Многослойная оболочка моделируется 4-узловыми элементами типа «SHELL», для моделирования ударников из гиперупругого материала используется 8-узловой элемент, град моделируется методом сглаженных частиц (SPH). Для решения задачи определения собственных форм и частот используется метод Ланцоша. Задача о нестационарном деформировании тонкостенных конструкций решается с помощью центрально-разностной схемы второго порядка точности с автоматическим выбором шага по времени согласно критерию Куранта-Фридрихса-Леви.

В параграфе 1.5 описан метод штрафа, который используется для решения контактных задач. **В параграфе 1.6** приведены функциональные зависимости для основных критериев разрушения ПКМ и когезионной связи между слоями оболочки. Рассмотрены следующие критерии разрушения: максимальных деформаций, максимальных напряжений, Tsai-Wu, Tsai-Hill, Hoffman, Hashin, Norris, Norris-McKinnon, Fischer, DeAlia, Puppo-Evensen, Chang-Chang, Puck, LaRC.

Вторая глава посвящена решению задач нахождения собственных форм и частот колебаний слоистых элементов конструкций при наличии межслоевых дефектов типа расслоений, а также определению амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) указанных конструкций при гармоническом воздействии.

В параграфе 2.1 изложен метод численного моделирования поведения слоистых элементов конструкций из ПКМ с дефектами при стационарных воздействиях. **В параграфе 2.2** решена задача определения собственных форм и собственных частот для слоистой гладкой прямоугольной пластины при наличии множественных дефектов эллипсоидальной формы. Предполагается, что дефекты присутствуют по всей толщине пакета, а центры расположены на расстоянии 107, 272 и 372 мм от торца пластины. Определены первые 10 собственных форм и частот для пластины длиной $a = 532$ мм, шириной $b = 282$ мм, толщиной монослоя $\delta = 0.19$ мм.

Формат укладки пластины следующий: $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{\text{sym}}$ (всего 12 слоёв). В результате решения задачи показано, что в случае наличия множественных эллипсоидальных дефектов в конструкции присутствуют формы собственных колебаний, которые не свойственны случаю без дефектов. Эти формы обусловлены локальным снижением жёсткости конструкции в зоне дефектов и их способностью к «раскрытию». Анализ АЧХ в центрах дефектов при действии равномерного поля давления интенсивностью $p_0 = 0.01 \text{ МПа}$. показал, что амплитуда отличается до 8.5 раз в диапазоне частот от 0.4 до 1.4 кГц в случае наличия дефектов. Аналогичная задача решена для гладкой цилиндрической панели с множественными дефектами в форме эллипса и стрелой подъема с рассмотрена в **параграфе 2.3**. Предполагалось, что формат укладки слоёв соответствует случаю, рассмотренному в параграфе 2.2. Анализ результатов решения задачи позволяет сделать вывод о наличии, также как и в пластине, формы собственных колебаний, которые не свойственны конструкции без дефектов. Анализ АЧХ в центрах дефектов при действии равномерного поля давления интенсивностью $p_0 = 0.01 \text{ МПа}$. показал, что амплитуда точек центров дефектов в диапазоне частот от 2.5 до 5.5 кГц больше в от 2 до 10 раз в случае наличия дефектов между слоями.

Параграф 2.4 посвящён решению задачи гармонического анализа для фрагмента круговой подкреплённой цилиндрической оболочки с толщиной монослоя δ . В качестве продольных подкрепляющих элементов использовались стрингеры таврового сечения, поперечных набор описывался шпангоутами швеллерного поперечного сечения. Формат укладки монослоёв аналогичен рассмотренному ранее. Также в качестве межслоевых дефектов рассмотрены дефекты эллипсоидальной формы с отношением полуосей 0.5. При этом центр дефектов располагался в центральном сечении в межстрингерной зоне один под другим между всеми слоями обшивки. Расчёты проводились для фрагмента полой подкреплённой цилиндрической оболочки длиной $a = 532 \text{ мм}$, шириной $b = 300 \text{ мм}$, радиусом $R = 200 \text{ мм}$ и толщиной монослоя $\delta = 0.19 \text{ мм}$, шаг поперечного набора $h_x = 170 \text{ мм}$, шаг продольного набора $h_\alpha = 105 \text{ мм}$.

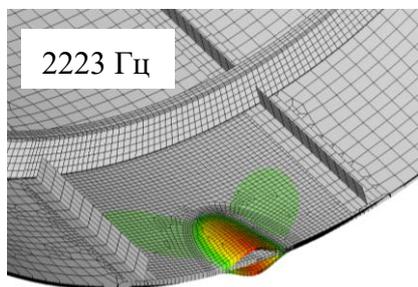


Рис. 5 – Собственная форма и частота

На рис. 5 показана собственная форма и частота, характерная для «раскрытия» дефектов.

Построена АЧХ центральной точки расслоения в подкреплённой цилиндрической оболочке при действии стационарной нагрузки, распределённой по внешней поверхности области дефекта $F(r, \varphi, z, t) = F_0 e^{i\omega t}$. В расчётах амплитуда давления принималась равной $F_0 = 3700 \text{ Н}$. Прогибы центров дефектов в диапазоне частот от 0.8 до 4 кГц больше до 10 раз в случае наличия дефектов между слоями. При этом наибольшее отличие в значении

амплитуды и характере поведения АЧХ наблюдается для слоя №1.

В третьей главе рассмотрены задачи нестационарного (не ударного) воздействия на слоистые элементы конструкции из ПКМ с дефектами. Целью проводимых исследований является определение несущих свойств тонкостенных конструкций с дефектами в том числе с учётом динамики развития дефектов по различным критериям разрушения для композитных материалов. **В параграфе 3.2** рассмотрена задача о действии на прямоугольную слоистую пластину, имеющую межслоевые дефекты эллиптической формы, внезапно приложенного давления амплитудой $p_0(x, y, z)$. Предполагалось, что граничные условия задачи соответствуют шарнирному опиранию вдоль длинных кромок пластины, при этом на коротких кромках реализовывались свободные граничные условия. Пластина моделировалась послойно с использованием оболочечных конечных элементов, рассмотренных в параграфе 1.4.

В качестве примера рассмотрена прямоугольная пластина длиной $a = 400$ мм, шириной $b = 200$ мм, выполненная из углепластика на основе ткани и эпоксидного связующего HexPly M21/40%/285T2/AS4C – 6К. Схема укладки пластины типовая: $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$, толщина монослоя $\delta = 0.285$ мм. Между всеми слоями в центральном сечении расположены дефекты в форме эллипса с осями $a_1 = 46$ мм и $a_2 = 26$ мм. Также предполагалось, что давление по пластине распределено равномерно с амплитудой $p_0 = 0.6$ МПа. Количество конечных элементов (КЭ) в модели составляет 27300. Шаг интегрирования по времени для центрально разностной схемы равен $\Delta t = 1 \cdot 10^{-7}$ с. В результате решения задачи определено распределение коэффициентов запаса прочности по критериям разрушения для ПКМ. Показано, что прочность пластины снижается в 1.14 раза в случае наличия дефектов по критерию Fischer.

Параграф 3.3 посвящён решению задачи о действии ударной волны заданной энергии взрыва на цилиндрическую подкреплённую пологую панель со стрелой подъёма c , имеющую межслоевые дефекты. В задаче предполагалось, что подкрепляющие элементы имеют форму Т-образного

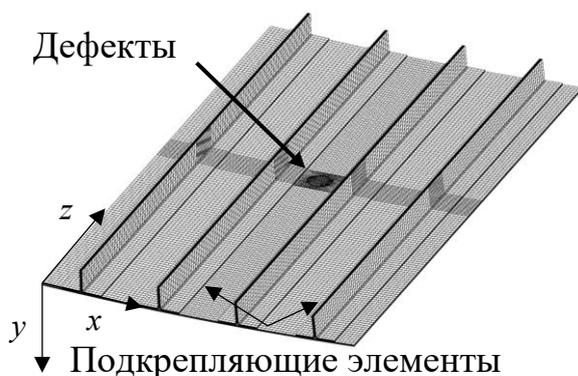


Рис. 6 – Подкреплённая цилиндрическая оболочка

сечения. Дефекты эллиптической формы расположены в межстрингерной зоне в центральном сечении (рис. 6).

Граничные условия соответствуют шарнирному опиранию вдоль длинных кромок. В качестве внешнего воздействия рассматривается взрыв с энергией E , результатом которого является сферическая волна с центром в точке, находящейся на расстоянии

L_1 центра панели с внешней стороны. Функциональная зависимость давления, действующего на панель, соответствует (11).

Результаты решения задачи представлены на панели длиной панели $a = 750$ мм, ширина $b = 490$ мм, стрела подъёма $c = 7.38$ мм. Формат укладки обшивки: $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$. Стрингеры Т-образного сечения (высота стенки 37 мм, суммарная ширина полок 61 мм), формат укладки стрингеров: $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$. Эллиптические дефекты (с осями $a_1 = 36$ мм и $a_2 = 26$ мм) расположены между всеми слоями обшивки. Энергия взрыва соответствовала $E = 209.2$ кДж, центр сферической волны находится на расстоянии $L_1 = 500$ мм с внешней стороны панели. Количество КЭ в конечно-элементной модели (КЭМ) составляет 445952. Шаг интегрирования по времени $\Delta t = 1 \cdot 10^{-8}$ с. В результате расчёта показано, что в случае наличия дефектов снижение прочности достигает 1.86 раза по критерию Pusk.

Как частный случай рассмотренной ранее в п. 2.3 подкреплённой панели, решена задача для прямоугольной в плане полой гладкой панели. Функциональная зависимость давления, действующего на панель, представляется в следующем виде: $p(\varphi, t) = p_0 \cos^2 \varphi H(\pi/2 - |\varphi|)$, $p_0 = 1.0$ МПа. Граничные условия соответствуют рассмотренной выше подкреплённой панели. Расчёты показывают, что минимальное значение коэффициента запаса прочности для критерия LaRC03 составляет 0.88, в случае отсутствия дефектов – 1.38. Прочность пластины по критерию LaRC03 в случае наличия дефектов снижается в 1.57 раз.

В параграфе 3.4 рассматривается подкреплённая цилиндрическая оболочка (рис. 7) длиной L и радиусом R , находящаяся под действием сферической волны давления, соответствующей энергии взрыва E . Предполагается, что в зоне между стрингерами и шпангоутами в центральном сечении расположены эллиптические дефекты между всеми

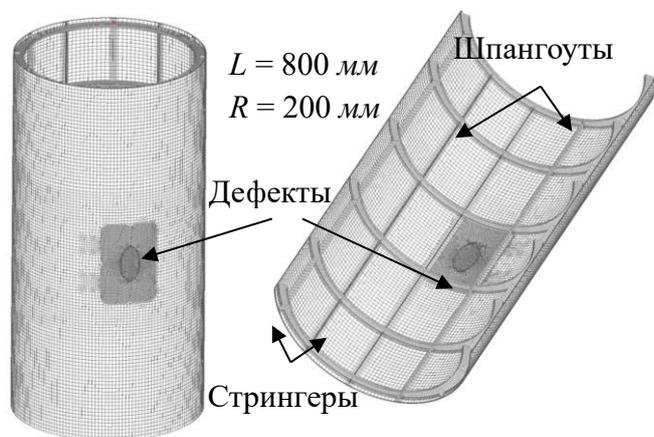


Рис. 7 – Подкреплённая цилиндрическая оболочка

слоями обшивки. Граничные условия соответствуют шарнирному опиранию по торцам оболочки. Оболочка моделировалась послойно с использованием оболочечных КЭ типа «SHELL». Подкрепляющие элементы соответствуют задаче, рассмотренной в п. 2.4. Формат укладки оболочки: $[+45^\circ/-$

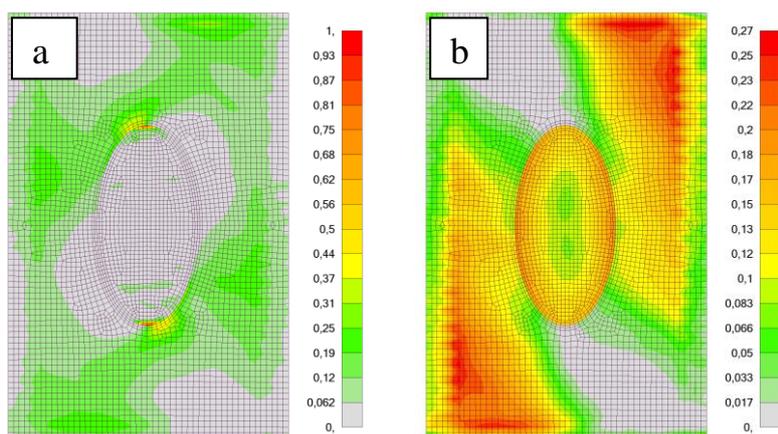


Рис. 8 – Распределение индекса разрушения по критерию LaRC03 в момент времени 0.4 мс

$45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$.

На оболочку действует взрывная сферическая волна, эпицентр взрыва расположен на расстоянии $L_1 = 900 \text{ мм}$ от внешней поверхности оболочки, энергия взрыва составляет $E = 415 \text{ кДж}$. Всего в модели 320283 конечных элемента. Шаг интегрирования равен $\Delta t = 0.2 \cdot 10^{-7} \text{ с}$.

В зоне между стрингерами и шпангоутами в центральном сечении расположены эллиптические дефекты (с осями $a_1 = 80 \text{ мм}$ и $a_2 = 45 \text{ мм}$) между всеми слоями обшивки. Максимальное значение индекса разрушения по критерию LaRC03 в случае наличия дефектов в 3.7 раза больше, чем в случае их отсутствия (рис. 8). В качестве частного случая рассмотрена аналогичная задача для гладкой оболочки с указанными выше дефектами. Результаты расчёта показывают, что наиболее консервативную оценку демонстрирует критерий LaRC03 (форма разрушения – сжатие волокна, сжатие матрицы). Минимальный коэффициент запаса по критерию LaRC03 снижается в 1.33 раза для случая наличия дефектов между слоями.

В четвёртой главе рассмотрены задачи ударного воздействия, реализуемые с помощью импакторов (ударников) различной формы, на слоистые тонкостенные элементы конструкций из ПКМ с дефектами.

Основной целью исследования является изучение динамики развития межслоевых дефектов в результате ударного воздействия. В главе рассматриваются задачи низкоскоростного удара с начальными скоростями импакторов не превышающими 10 м/с . Рассмотрены задачи как для абсолютно твёрдых импакторов, так и для импакторов, изготовленных из реальных материалов (резина, лёд). Также в главе приведены результаты валидации предложенного метода исследования динамики развития дефектов по результатам экспериментальных данных.

В параграфе 4.1 рассмотрено ударное воздействие жёстким полусферическим импактором по подкреплённой цилиндрической панели, конструкция которой была рассмотрена в п. 3.3. Геометрия ударника соответствует полусфере, масса принималась равной $m = 5 \text{ кг}$, максимальная начальная скорость составляет $V_0^{\max} = 8 \text{ м/с}$. Ударник в начальном положении соприкасается вершиной полусферы с внешней обшивкой панели. Временной интервал ударного взаимодействия составляет $[0, t_k]$, $t_k = 6 \text{ мс}$, шаг интегрирования по времени составляет $\Delta t = 1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$. Модель состоит из 445952 элементов. Направление удара

совпадает с вектором нормали в точках соударения: удар в межстрингерную зону, удар в стрингер. Максимальная энергия удара составляет 160 Дж. Результаты расчетов показывают, что наличие дефектов в межстрингерной зоне для рассматриваемого объекта приводит к увеличению площади расслоения на 27%, а наличие дефектов в подстрингерной зоне – на 18.2%.

В параграфе 4.2 рассмотрено ударное воздействие жёстким полусферическим импактором по подкреплённой цилиндрической оболочке, конструкция которой была рассмотрена в п. 3.4. Предполагается, что, как и в случае п. 3.4 в конструкции оболочки имеются множественные дефекты эллипсоидальной формы. Геометрия ударника, его масса, начальное положение и начальная скорость соответствует задаче, рассмотренной выше. Рассматриваемый временной интервал ударного взаимодействия составляет $[0, t_k]$, $t_k = 4.5 \text{ мс}$, шаг интегрирования по времени составляет $\Delta t = 1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$. Модель состоит из 330283 КЭ.

На рис. 9 представлено состояние конструкции цилиндрической подкреплённой оболочки при наличии дефектов в различные моменты времени при ударном воздействии абсолютно жёсткого импактора с энергией 160 Дж.

Максимальный прогиб обшивки в точке удара в случае наличия дефектов в 1.27 раза больше при энергии удара $E = 62.5 \text{ Дж}$ и в 1.07 раза больше при энергии удара $E = 160 \text{ Дж}$. В случае наличия дефектов площадь расслоения больше в 3.76 раза (с учётом площади дефекта).

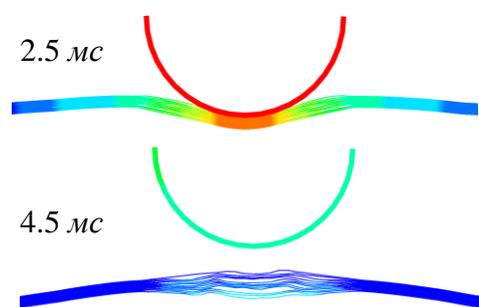


Рис. 9 – Состояние конструкции при ударном воздействии

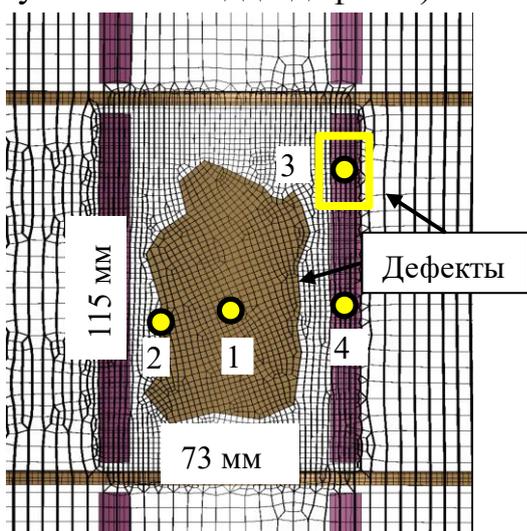


Рис. 10 – Межслоевой дефект произвольной формы в подкреплённой цилиндрической оболочке

Также **в параграфе 4.2** рассмотрено ударное воздействие жёстким полусферическим импактором по подкреплённой цилиндрической оболочке, которая соответствует задаче, рассмотренной в п. 4.2, за исключением формы дефектов, которые в данной задаче имеют произвольную форму (рис. 10). Узлы по границе дефекта распределены равномерно. Рассматриваемый временной интервал ударного взаимодействия составляет $[0, t_k]$, $t_k = 5 \text{ мс}$, шаг интегрирования по времени составляет $\Delta t = 1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$. Модель состоит из 355424 КЭ.

Как следует из анализа результатов решения задачи, площадь расслоения при ударе в центр дефектов увеличивается на

10% в случае их наличия; площадь расслоения при ударе в границу дефектов увеличивается на 12.9% в случае их наличия; площадь отслоения полки стрингера увеличивается в 3.75 раза в случае удара в центр стрингера.

В параграфе 4.3 рассмотрено ударное воздействие одиночным фрагментом пневматика на гладкую прямоугольную пластину. Пневматик

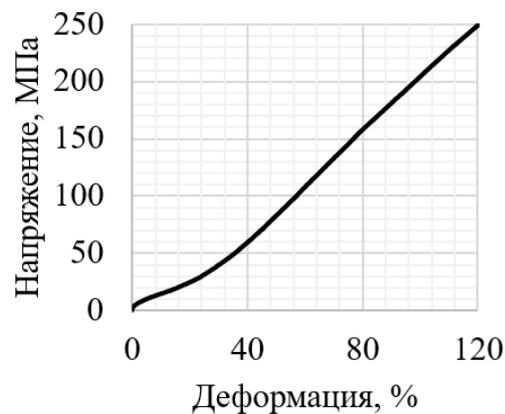


Рис. 11 – Диаграмма деформирования материала пневматика

представляет собой прямоугольный параллелепипед длиной $L = 50 \text{ мм}$ и стороной основания $b = 20 \text{ мм}$. Диаграмма деформирования материала пневматика представлена на рис. 11.

Для моделирования используются объёмные 8-узловые конечные элементы гексагональной формы с характерным размером $a = 1.67 \text{ мм}$. В качестве примера рассмотрена пластина длиной $a = 320 \text{ мм}$, шириной $b = 224 \text{ мм}$, толщиной монослоя $\delta = 0.196 \text{ мм}$. Формат укладки пластины: $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$.

Рассматриваемый временной интервал ударного взаимодействия составляет $[0, t_k]$, $t_k = 7 \text{ мс}$, шаг интегрирования по времени составляет $\Delta t = 2 \cdot 10^{-7} \text{ с}$. Модель состоит из 48175 КЭ.

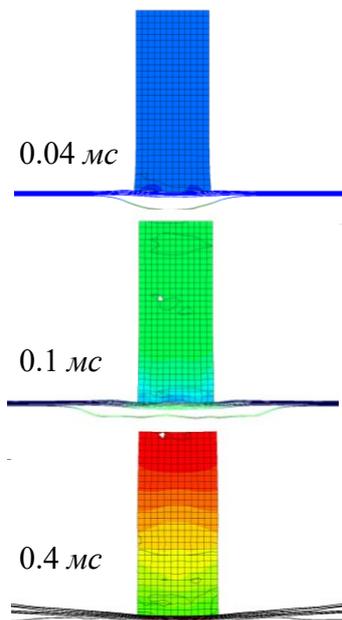


Рис. 12 – Состояние модели при ударе

В случае наличия дефектов наблюдается увеличение прогиба в точке соударения в 2 раза во временном интервале $[t_1, t_2]$, $t_1 = 1.5 \text{ мс}$, $t_2 = 3 \text{ мс}$. На рис. 12 показано состояние конструкции при наличии дефектов в различные моменты времени. Результаты расчёта показывают, что коэффициент запаса прочности по критерию Risk снижается в 3.36 раза в случае наличия в пластине дефектов.

Также в параграфе 4.3 рассмотрено ударное воздействие множественными фрагментами пневматика по подкреплённой цилиндрической оболочке с дефектами, рассмотренной в п. 3.4. Фрагменты пневматика имеют такие же параметры, как и фрагмент, описанный выше. Векторы скорости фрагментов совпадают с направлением нормали к обшивке в точках соударения. Касание фрагментов с оболочкой происходит одновременно. Рассматриваемый

временной интервал ударного взаимодействия составляет $[0, t_k]$, $t_k = 5 \text{ мс}$, шаг интегрирования по времени составляет $\Delta t = 2 \cdot 10^{-7} \text{ с}$. Модель состоит из 467552 КЭ. В случае наличия дефектов наблюдается увеличение прогиба в точке соударения центрального ударника в 6 раза во временном интервале $[t_1, t_2]$, $t_1 = 0.5 \text{ мс}$, $t_2 = 1 \text{ мс}$. В результате расчёта показано, что

максимальные действующие напряжения в продольном направлении увеличиваются в 3.27 раза в случае наличия дефектов.

Параграф 4.4 посвящен решению задачи о действии на прямоугольную слоистую подкрепленную пластину града, имеющего форму шара радиуса R . Предполагается, что в центре пластины, между всеми слоями, расположены дефекты круглой формы с радиусом r . Панель подкреплена двумя стрингерами, которые выполнены из того же материала, что и обшивка и имеют тавровое сечение. Граничные условия для пластины соответствуют шарнирному опиранию торцов пластины. Предполагается, что скорость града направлена перпендикулярно внешней поверхности обшивки, при этом град моделируется с помощью технологии SPH.

Задача решалась для прямоугольной слоистой подкреплённой пластины длиной $a = 500$ мм, шириной $b = 500$ мм, толщиной монослоя $\delta = 0.19$ мм, радиусом дефекта $r = 100$ мм. Формат укладки пластины: $[-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{\text{sym}}$. Сечение стрингеров имеет размеры 62.5×2.9 мм. Начальная скорость града составляет 10 м/с. Рассматриваемый временной интервал ударного взаимодействия составляет $[0, t_k]$, $t_k = 6.5$ мс, шаг интегрирования по времени составляет $\Delta t = 2 \cdot 10^{-7}$ с. Модель состоит из 65762 КЭ типа «SPH» и 113384 типа «SHELL». На рис. 13 показано состояние конструкции в момент времени 6.3 мс (а – с дефектами, б – без дефектов).

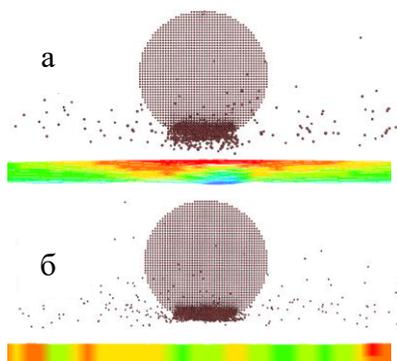


Рис. 13 – Состояние конструкции в момент времени 6.3 мс (а-с дефектами, б-без дефектов)

Из рис. 13 следует, что в случае наличия дефектов в пластине наблюдается изменение характера поведения конструкции в зоне удара: увеличение прогибов и «раскрытие» дефектов.

Четвертая глава завершается апробацией (валидацией) разработанного метода динамики развития дефектов в слоистых элементах конструкции на основе сравнения результатов численного моделирования с экспериментом.

В параграфе 4.5 решена задача ударного воздействия стальным полусферическим импактором по внешней поверхности однопролётной четырёхстрингерной панели длиной $a = 500$ мм, шириной $b = 515$ мм, выполненной из ПКМ PRISM EP2400/TX1100 IMS65-24K-UD196-6.35 на основе углеленты и эпоксидного связующего.

В центр панели с внешней стороны обшивки наносится ударное повреждение с помощью испытательного копера с вертикально падающим грузом Dynatur 9250HV фирмы INSTRON с энергией 136 Дж. Удар наносится стальным бойком с полусферическим наконечником. Диаметр бойка $D = 25.4$ мм, масса $m = 5.5$ кг, скорость нанесения повреждения $V = 7$ м/с. На рис. 14 показаны результаты расчёта и ультразвукового контроля (УЗК) панели после испытаний на удар.

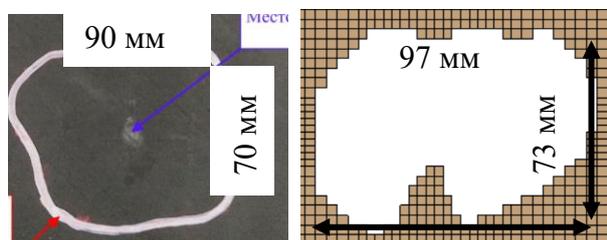


Рис. 14 - Результаты УЗК и расчёта

Указанная задача также была решена с использованием разработанного в диссертационной

работе метода решения задач ударного взаимодействия на элементы конструкций из ПКМ с дефектами.

Рассматриваемый временной интервал составляет $[0, t_k]$, $t_k = 6.5$ мс, шаг интегрирования по времени составляет $\Delta t = 1.77 \cdot 10^{-8}$ с. Модель состоит из 605233 КЭ. Характерный размер элементов в зоне соударения составляет $l_1 = 3$ мм, в регулярной зоне конструкции - $l_2 = 5.8$ мм. Зона расслоения имеет размеры 97×73 мм (площадь расслоения ≈ 7081 мм²). Относительная разница между результатами эксперименты и результатами моделирования составляет 11%. Аналогичные расчётно-экспериментальные исследования были проведены для случая нанесения ударного повреждения в межстрингерную зону с энергией удара 90 Дж и для случая удара в ось стрингера с энергией 135 Дж. Относительная разница площадей зон расслоений не превышает 11%.

Основные результаты и выводы

1. Решен новый класс задач динамического поведения элементов тонкостенных конструкций, изготовленных из слоистых композиционных материалов при наличии внутренних дефектов типа расслоений произвольной формы, размеров и расположений.

2. Разработан метод расчёта слоистых элементов конструкций из ПКМ, позволяющая учитывать наличие дефектов типа расслоений различной формы, размеров и расположения при действии динамических воздействий различного характера.

3. В рамках предложенного метода разработана программа для автоматизированного создания КЭМ оболочек, панелей, пластин с подкреплениями и без них при наличии дефектов.

4. Разработан метод решения задач стационарного и нестационарного воздействия на тонкостенные слоистые элементы конструкций канонической формы, имеющие межслоевые дефекты.

5. Анализ результатов решения задач стационарного воздействия на элементы конструкции при наличии дефектов показал локальное снижение жёсткости соединения в зоне дефектов, а также появление дополнительных

форм собственных колебаний и смещение спектра в зону высоких частот.

6. При решении задач нестационарного воздействия на элементы конструкции в случае наличия дефектов показано существенное отличие в характере распределения действующих напряжений, индексов разрушения и коэффициентов запаса прочности по различным критериям разрушения для ПКМ.

7. Решены задачи о нестационарном воздействии абсолютно жестких и гиперупругих ударников на слоистые пластины, панели и цилиндрические оболочки при наличии дефектов. Показано, что учёт деградации адгезионной связи между слоями при наличии дефектов может приводить к росту дефектов, вплоть до критических значений.

8. Проведена валидация методов по результатам эксперимента на примере удара стальным бойком с энергиями удара 90 и 136 Дж по подкреплённой панели. Показано, что относительная разница максимальной площади расслоения не превышает 11%.

9. Разработанные методы используются при оценке влияния дефектов типа расслоений на слоистые элементы конструкций из ПКМ на этапах проектирования, разработки, сертификации и эксплуатации летательных аппаратов.

Список публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в базу данных SCOPUS:

1. Medvedskiy A.L., Rabinskiy L.N., Martirosov M.I., Ershova A.Yu., Khomchenko A.V. The study of changes in strength of polymer composite panels with interlayer defects under the action of unsteady load // The Asian International Journal of Life Sciences. Supplement 21 (1). Philippines, 2019. P. 565 - 576. – (SCOPUS)

2. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Dedova D.V. Assessment of the strength of a composite package with internal defects according to various failures criteria under the influence of unsteady load // Periodico Tche Quimica. Vol. 17, No. 35. Brasil, 2020. P. 1218-1230. – (SCOPUS)

3. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Dedova D.V. Behaviour of a cylindrical reinforced carbon fiber shell under impact load. // TEM Journal. Vol. 10, No. 4. Serbia, 2021. P. 1597-1604. – (SCOPUS)

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Напряженно-деформированное состояние многослойной композитной пластины при наличии межслоевых дефектов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 8. Тула, ТулГУ, 2018. С. 168-179.

2. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Сравнительный анализ критериев разрушения многослойной композитной пластины при наличии межслоевых дефектов // Известия Тульского

государственного университета. Технические науки. Выпуск 9. Тула, ТулГУ, 2018. С. 399-409.

3. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численное моделирование поведения пластины из полимерного композита под действием динамических нагрузок при наличии множественных дефектов между слоями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 10. Тула, ТулГУ, 2018. С. 271-278.

4. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Поведение полой композитной панели с внутренними повреждениями под действием нестационарной нагрузки // Научно-технический журнал «Строительная механика и расчет сооружений». № 2, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2019. С. 43-47.

5. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численный анализ поведения слоистой композитной панели с межслоевыми дефектами под действием динамических нагрузок // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. Т. 15. №2. 2019. С. 127-134.

6. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численное исследование разрушения плоской панели из ПКМ с внутренними дефектами под действием нестационарной нагрузки // Научно-технический журнал «Авиационная промышленность». №1, 2019. С. 52-56.

7. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Динамика подкреплённой композитной панели со смешанной укладкой монослоёв с внутренними повреждениями при нестационарных воздействиях // Вестник Брянского государственного технического университета. №7(80), БГТУ, 2019. С. 35-41.

8. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Поведение полой композитной панели с начальными дефектами при ударном воздействии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 12. Тула, ТулГУ, 2019. С. 159-163.

9. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Поведение полой композитной четырёхстрингерной панели с внутренними повреждениями при нестационарном воздействии // Учёные записки ЦАГИ. Т. LI, №2, 2020. С. 47-56.

10. Мартиросов М.И., Медведский А.Л., Хомченко А.В. Поведение слоистых элементов конструкций из полимерного композита с внутренними дефектами при нестационарных воздействиях // Всероссийский научный журнал «Механика композиционных материалов и конструкций». Т. 26, №2, 2020. С. 259-268.

11. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Механика деформирования и разрушения полимерных композитов при наличии множественных расслоений произвольной формы под действием динамических нагрузок // Труды МАИ, 2022. №124. С. 1-40.

12. Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Расчетно-экспериментальное исследование поведения плоской подкрепленной панели из углепластика при ударе // Труды МАИ, №126, 2022. С. 1-20.

Публикации в других изданиях:

1. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Напряженно-деформированное состояние многослойной изотропной пластины при наличии межслоевых технологических дефектов // *Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 2. М., МАИ, 2018. С. 101-102.*
2. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численное исследование разрушения прямоугольной композитной пластины при наличии межслоевых дефектов различной природы // *Сборник тезисов докладов 8-й Всероссийской научной конференции «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред».* М., ИПРИМ РАН, 2018. С. 44.
3. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Поведение прямоугольной пластины из полимерного композиционного материала с внутренними дефектами под действием динамических нагрузок различного характера // *Материалы XXV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 1. М., МАИ, 2019. С. 149-150.*
4. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Анализ поведения пластины из однонаправленного полимерного композита с множественными межслоевыми дефектами // *Материалы XXV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 1. М., МАИ, 2019. С. 151-152.*
5. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Разрушение пластин и панелей из полимерных композиционных материалов при наличии повреждений под действием нестационарной нагрузки // *Материалы XXV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 2. М., МАИ, 2019. С. 173-177.*
6. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численное исследование разрушения композитной пластины при наличии межслоевых дефектов различной природы // *Сборник трудов «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред».* М., ИПРИМ РАН, 2019. С. 70-76.
7. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Рязанцева М.Ю., Хомченко А.В. Поведение композитных пластин и панелей с внутренними дефектами под действием динамических нагрузок различного характера // *Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения».* М., МГУ, 2019. С. 158-159.
8. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численное исследование поведения многослойной композитной пластины под действием динамических нагрузок при наличии внутренних повреждений // *Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам.* М., МАИ, 2019. С. 301-303.

9. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Разрушение плоской композитной панели с множественными межслоевыми дефектами под действием нестационарной нагрузки // Материалы Международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». Витебск, ВГТУ, 2019. С. 23-25.

10. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численное исследование поведения композитной пластины с множественными повреждениями под действием динамических нагрузок // Сборник трудов XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Т. 3. Уфа, БашГУ, 2019. С. 552-554.

11. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Исследование деформирования и разрушения панелей из полимерного композита с множественными внутренними дефектами под действием динамических нагрузок // Сборник материалов LXI Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». Тольятти, ТГУ, 2019. С. 51-52.

12. 19. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численное исследование динамики композитных подкрепленных панелей с межслоевыми дефектами технологического характера при нестационарных воздействиях // Тезисы докладов 6-ой открытой Всероссийской (XVIII научно-технической) конференции по аэроакустике. М., ЦАГИ, 2019. С. 230-231.

13. Хомченко А.В., Медведский А.Л., Мартиросов М.И. Динамика композитных элементов конструкций с множественными межслоевыми дефектами под действием нестационарной нагрузки // Тезисы докладов 18-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика». М., МАИ, 2019. С. 211-212 (рус.), С. 507 (англ.).

14. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Разрушение подкрепленной пологой панели из полимерного композиционного материала с внутренними дефектами под действием нестационарной нагрузки // Сборник тезисов докладов 9-й Всероссийской научной конференции «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред». М., ИПРИМ РАН, 2019. С. 61-62.

15. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Динамика подкрепленных композитных элементов конструкций с множественными межслоевыми дефектами под действием нестационарных нагрузок // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте». Часть 2. Гомель, БелГУТ, 2019. С. 229-230.

16. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Разрушение цилиндрической панели из полимерного композиционного материала с внутренними дефектами под действием взрывной волны // Сборник трудов «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», посвященный 30-летию ИПРИМ РАН. М., ИПРИМ РАН, 2019. С. 176-180.

17. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Поведение элементов конструкций из углепластика с внутренними дефектами при нестационарных воздействиях // Материалы XXVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы конструкций и

сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 1. М., МАИ, 2020. С. 157-159.

18. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Особенности расчета на прочность слоистой цилиндрической композитной панели с межслоевыми дефектами при действии ударной нагрузки // Материалы XXVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 1. М., МАИ, 2020. С. 159-161.

19. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численный анализ влияния на прочность межслоевых дефектов типа расслоений в подкрепленной композитной панели при взрывном воздействии // Сборник материалов LXII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». Витебск, НАН Беларуси, 2020. С. 9-11.

20. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Влияние на прочность межслоевых дефектов в подкрепленной композитной панели при действии взрывной нагрузки // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли. М., МАИ, 2020. С. 308-310.

21. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Рязанцева М.Ю., Хомченко А.В. Изучение деформирования и разрушения подкрепленной цилиндрической панели из полимерного композита с внутренними дефектами при нестационарных воздействиях // Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения». М., МГУ, 2020. С. 154-155.

22. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Оценка влияния межслоевых дефектов эллиптической формы в элементах конструкций из углепластика при нестационарных воздействиях // Сборник трудов «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред». М., ИПРИМ РАН, 2020. С. 186-188.

23. Хомченко А.В., Медведский А.Л., Мартиросов М.И. Влияние расслоений на поведение слоистых элементов конструкций из углепластика под действием динамических нагрузок // Тезисы докладов 19-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика». М., МАИ, 2020. С. 506-507.

24. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Прочность композитных элементов конструкций летательных аппаратов при наличии дефектов под действием динамических нагрузок // Сборник трудов 63-ей Всероссийской научной конференции МФТИ. Аэрокосмические технологии. М., МФТИ, 2020. С. 382 - 384.

25. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Расслоения в элементах конструкций из полимерных композитов и их влияние на прочность при действии динамических нагрузок // Материалы X Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте». Часть 1. Гомель, БелГУТ, 2020. С. 105-106.

26. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Анализ деформирования и разрушения композитной подкрепленной цилиндрической панели с внутренними дефектами при нестационарных воздействиях // Сборник трудов X-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур». М., МИСиС, 2021. С. 107.

27. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Рязанцева М.Ю., Хомченко А.В. Поведение композитной пластины с дефектами произвольной формы при действии динамической нагрузки // Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения». М., МГУ, 2021. С. 161-162.

28. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Оценка влияния множественных межслоевых дефектов произвольной формы на поведение композитной пластины при динамических нагрузках // Материалы XXVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 1. М., МАИ, 2021. С. 162-164.

29. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Межслоевые дефекты в цилиндрической подкрепленной оболочке из слоистого углепластика под действием динамической нагрузки // Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. М., МАИ, 2021. С. 524-526.

30. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Исследование поведения элементов конструкций из полимерных композитов с внутренними дефектами при действии динамических нагрузок // Сборник материалов LXIII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». Тольятти, ТГУ, 2021. С. 251-252.

31. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Взрывное воздействие на подкрепленную цилиндрическую оболочку из полимерного композита с внутренними дефектами // Тезисы докладов 7-ой открытой Всероссийской (XIX научно-технической) конференции по аэроакустике / Всероссийский аэроакустический форум / Труды ЦАГИ. Выпуск 2807. М., ЦАГИ, 2021. С. 126-127.

32. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Влияние внутренних дефектов на поведение армированной слоистой оболочки при воздействии фрагментами пневматика // Тезисы докладов 7-ой открытой Всероссийской (XIX научно-технической) конференции по аэроакустике / Всероссийский аэроакустический форум / Труды ЦАГИ. Выпуск 2807. М., ЦАГИ, 2021. С. 127-128.

33. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В., Дедова Д.В. Механика разрушения полимерных композитов при наличии множественных расслоений различной формы под действием динамических нагрузок // Тезисы докладов II Международной конференции «Композитные материалы и конструкции» / Сборник «Авиация и космонавтика». М., МАИ, 2021. С. 29-30 (рус.), С. 30 (англ.).

34. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Динамический анализ деформирования и разрушения элементов конструкций из композита с межслоевыми дефектами // Сборник трудов 11-ой Всероссийской научной конференции «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред». М., ИПРИМ РАН, 2021. С. 116-125.

35. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Поведение элементов конструкций из полимерных композитов с отклонениями при нестационарных воздействиях // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте». Часть

2. Гомель, БелГУТ, 2021. С. 157-159.

36. 48. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численное исследование прочности подкрепленной цилиндрической оболочки из полимерного композита с внутренними дефектами при действии динамических нагрузок // Труды 64-ой Всероссийской научной конференции МФТИ. Аэрокосмические технологии. М., МФТИ, 2021. С. 208-209.

37. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Моделирование дефектов типа расслоений и их влияние на поведение композитных элементов конструкций в случае нестационарных воздействий // Материалы XXVIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 1. М., МАИ, 2022. С.133-135.

38. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численное исследование влияния внутренних дефектов типа расслоений на прочность гладких и подкрепленных элементов композитных конструкций при нестационарных воздействиях различного типа // Материалы XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли. М., МАИ, 2022. С. 211-213.

39. Дедова Д.В., Мартиросов М.И., Медведский А.Л., Хомченко А.В. Численное исследование поведения элементов конструкций из полимерных композитов с межслоевыми дефектами произвольной формы // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов». Новосибирск, СибНИА им. С.А. Чаплыгина, 2022. С. 20-22.

40. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Поведение элементов конструкций из углепластика с множественными межслоевыми дефектами произвольной формы // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте». Часть 2. Гомель, БелГУТ, 2022. С. 214-215.

41. Медведский А.Л., Дедова Д.В., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Исследование поведения композитных элементов конструкций с нарушением адгезионной связи между монослоями при динамических воздействиях // XXIX Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 2. М., МАИ, 2023. С.29-32.

42. Дедова Д.В., Мартиросов М.И., Медведский А.Л., Хомченко А.В. Поведение элементов конструкций из углепластика при наличии множественных повреждений произвольной конфигурации между монослоями при динамических воздействиях // XX Научно-техническая конференция по аэроакустике. Суздаль, 2023. С. 231-232.