

Научная статья  
УДК 539.422.52  
DOI: [10.34759/trd-2022-124-06](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-06)

**МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ  
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ НАЛИЧИИ  
МНОЖЕСТВЕННЫХ РАССЛОЕНИЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

**Александр Леонидович Медведский<sup>1</sup>, Михаил Иванович Мартиросов<sup>2</sup>,  
Антон Васильевич Хомченко<sup>3</sup>✉**

<sup>1</sup>Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского,  
Жуковский, Московская область, Россия

<sup>2,3</sup>Корпорация «Иркут», Москва, Россия

<sup>3</sup>[khomchenkoanton@yandex.ru](mailto:khomchenkoanton@yandex.ru) ✉

*Аннотация.* В работе проведены исследования по оценке влияния внутренних дефектов (повреждений) типа расслоений различного размера, формы и расположения в слоистых элементах конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Предложена методика моделирования элементов конструкций из ПКМ с дефектами типа расслоений при действии динамических нагрузок различного характера.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, ортотропная подкреплённая оболочка, нестационарные воздействия, межслоевые дефекты (повреждения)

**Для цитирования:** 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. DOI: [10.34759/trd-2022-124-06](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-06)

## **FRACTURE AND DEFORMATION MECHANICS OF POLYMER COMPOSITES IN THE PRESENCE OF MULTIPLE BUNDLES OF ARBITRARY SHAPE UNDER THE ACTION OF DYNAMIC LOADS**

**Aleksandr L. Medvedsky<sup>1</sup>, Michael I. Martirosov<sup>2</sup>, Anton V. Khomchenko<sup>3</sup>✉**

<sup>1</sup>Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Moscow region, Russia

<sup>2,3</sup>Irkut Corporation, Moscow, Russia

<sup>3</sup>[khomchenkoanton@yandex.ru](mailto:khomchenkoanton@yandex.ru)✉

**Abstract.** Currently, elements of structures made of polymer composite materials (PCM) are becoming increasingly important, which have a number of advantages: high specific stiffness and strength, low specific gravity, high wear resistance and fatigue resistance, as well as the ability to create unique mechanical properties depending on the requirements for

the finished product, etc. With the above advantages, PCM products also have disadvantages, which include their sensitivity to damage.

To prove that the strength characteristics of PCM structures meet the certification requirements, it is necessary to carry out computational, theoretical and experimental work according to methods that allow us to show that the designed structural elements from PCM fully meet the requirements.

Such elements can be large-sized aggregates (wing and tail panels, center section panels, forkill, wing spars, stabilizer and keel), or they can be quite compact (fairings, fairing, nacelles, structural elements of mechanization).

Traditional structural metal materials, due to their stable characteristics, the duration of the period of preservation of mechanical and technological properties, provide the specified strength characteristics of the aviation structure. The level of safety provided by the PCM construction should not be lower than the level of safety provided by the metal construction.

In the work, studies were carried out to assess the impact of internal defects (damages) of the type of bundles of various sizes and locations in layered elements of structures made of polymer composite materials (PCM): a cylindrical reinforced shell, a reinforced cylindrical panel, a rectangular reinforced plate.

A technique is proposed for modeling structural elements made of PCM with defects of the type of bundles under the action of dynamic loads of various nature.

**Keywords:** polymer composite materials, orthotropic reinforced shell, unsteady impacts, interlayer defects (damages)

**For citation:** Medvedsky A.L, Martirosov M.I., Khomchenko A.V. Composites in the presence of multiple bundles of arbitrary shape under the action of dynamic loads. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. DOI: [10.34759/trd-2022-124-06](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-06)

## **1. Введение**

В настоящее время всё большее значение приобретают элементы конструкций из ПКМ, которые обладают рядом преимуществ: высокой удельной жёсткостью и прочностью, низкой удельной массой, высокой износостойкостью и сопротивлением усталости, а также возможностью создания уникальных механических свойств в зависимости от требований, предъявляемых к готовому изделию и т.д. При вышеперечисленных достоинствах, изделия из ПКМ имеют также и недостатки, к которым относится их чувствительность к повреждениям [1].

Под повреждением будем понимать отклонение изделия от нормы, вызванное производством или эксплуатацией. В авиации выделено пять категорий повреждений изделий из ПКМ в зависимости от требуемого уровня сохранения остаточной прочности, контролепригодности, интервала между осмотрами, условий появления повреждения, а также является или нет очевидным само событие, вызывающее повреждение.

В таблице 1 описаны категории повреждений изделий из ПКМ, принятые в авиации

Таблица 1 – Категории повреждений

Категория	Описание	Примеры
1	Практически необнаруживаемые дефекты глубиной после релаксации 0.3 ÷ 1 мм. Типовой производственный дефект типа расслоения равен одному квадратному дюйму: 25×25 мм (625 мм <sup>2</sup> ).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- удар бойком диаметром 25 мм;</li> <li>- производственный дефект, вызванный ударом по внешним и внутренним поверхностям;</li> <li>- наземный град (диаметр 61 мм для силовых элементов, 38 мм для съёмных элементов);</li> <li>- удар молнии малой мощности;</li> <li>- мусор со взлётной полосы;</li> </ul>
2	Повреждения, обнаруживаемые при нормальных формах осмотров и требующие ремонта. Разрушения, надёжно обнаруживаемые при тяжёлых формах технического обслуживания, но имеющие незначительные внешние проявления, например удар по панели в район стрингера с отслоением последнего.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- удар бойком диаметром 25 и 100 мм;</li> <li>- удары по внешним поверхностям при обслуживании самолёта;</li> <li>- пороговое значение энергии удара не устанавливается;</li> <li>- однопролётное отслоение стрингера от панели;</li> <li>- удар молнии</li> </ul>
3	Легко визуально обнаруживаемые в течении нескольких полётов повреждения, требующие ремонта	<ul style="list-style-type: none"> <li>- удар молнии</li> <li>- легкообнаруживаемое повреждение от обрывков шины</li> </ul>
4	Повреждение очевидное экипажу, требующее немедленного ремонта. Конструкция должна иметь прочность не ниже 0.7 от эксплуатационной нагрузки.	<p>Разрушение шины шасси:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- взрыв шины;</li> <li>- удар элементами обода;</li> <li>- удар не полностью отсоединившимися элементами разрушившейся шины;</li> <li>- удар полностью отсоединившимися элементами разрушившейся шины;</li> <li>- температурное воздействие.</li> </ul> <p>Град в полёте:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- градины до 61 мм в диаметре.</li> </ul> <p>Столкновение с птицей массой 1.8 кг;</p> <p>Удар дискретным источником:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- детерминистически определяемый, сквозное</li> </ul>

Категория	Описание	Примеры
		проникновение, очевидно обнаруживаемый. Лопатки ротора: - небольшие фрагменты; - 1/3 диска.
5	Серьёзное повреждение, вызванное аномальными наземными ил полётными событиями, которое не входит в расчётные критерии или процедуры обоснования прочности конструкции.	

На этапе проектирования и разработки конструкции необходимо определить критические размеры дефектов, при наличии которых обеспечивается остаточная прочность элемента конструкции.

## 2. Постановка задачи

### 2.1 Геометрия задачи

В работе рассматривается поведение следующих тонкостенных элементов конструкций, изготовленных из многослойных ПКМ, имеющих межслоевые дефекты [2-4]:

1) **Цилиндрическая оболочка**, имеющая продольный и поперечный подкрепляющий набор. Подкреплённая оболочка характеризуется радиусом  $R$ , длиной  $L$ , толщиной обшивки  $t$ , шагом поперечного набора  $H_1$ , шагом продольного набора  $H_2$ , (рисунок 1).

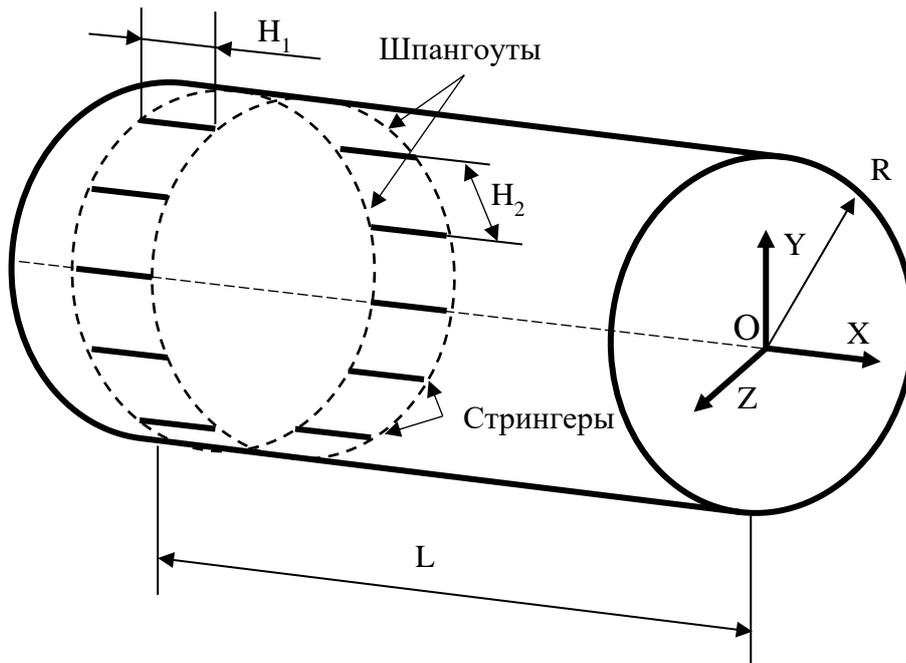


Рис. 1 – Подкреплённая цилиндрическая оболочка

Геометрические соотношения для срединной поверхности оболочки

принимают вид [4]:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{A} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{AB} V \frac{\partial A}{\partial y} - k_x W + \frac{1}{2} \theta_1^2, \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{B} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{AB} U \frac{\partial B}{\partial x} - k_y W + \frac{1}{2} \theta_2^2, \quad (2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{A} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{1}{AB} U \frac{\partial A}{\partial y} - \frac{1}{AB} V \frac{\partial B}{\partial x} + \theta_1 \theta_2, \quad (3)$$

$$\theta_1 = - \left( \frac{1}{A} \frac{\partial W}{\partial x} + k_x U \right), \quad \theta_2 = - \left( \frac{1}{B} \frac{\partial W}{\partial y} + k_y V \right), \quad (4)$$

где  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  – деформации вдоль координат  $x, y$  срединной поверхности;  $\gamma_{xy}$  – деформации сдвига в плоскости  $XOY$ ;  $k_x, k_y$  – главные кривизны оболочки осей  $x, y$ ;  $A, B$  – параметры Ламе, характеризующие геометрию оболочки (для цилиндрической

оболочки  $A = l, B = R$ ;  $U=U(x, y), V=V(x, y), W=W(x, y)$  – функции перемещений точек срединной поверхности вдоль осей  $x, y, z$  соответственно.

Функции изменения кривизн  $\chi_1, \chi_2$  и кручения  $\chi_{12}$  принимают вид:

$$\chi_1 = \frac{1}{A} \frac{\partial \Psi_x}{\partial x} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial y} \Psi_y, \quad (5)$$

$$\chi_2 = \frac{1}{B} \frac{\partial \Psi_y}{\partial y} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial x} \Psi_x, \quad (6)$$

$$2\chi_{12} = \frac{1}{A} \frac{\partial \Psi_y}{\partial x} + \frac{1}{B} \frac{\partial \Psi_x}{\partial y} - \frac{1}{AB} \left( \frac{\partial A}{\partial y} \Psi_x + \frac{\partial B}{\partial x} \Psi_y \right). \quad (7)$$

Здесь  $\Psi_x = \Psi_x(x, y), \Psi_y = \Psi_y(x, y)$  – углы поворота нормали в плоскостях  $XOZ, YOZ$ .

Усилия и моменты в случае дискретного подкрепления конструкции рёбрами жёсткости постоянной высоты для ортотропной оболочки имеют вид:

$$N_x = G_1 \left[ (h + F_x)(\varepsilon_x + \mu_2 \varepsilon_y) + S_x(\chi_1 + \mu_2 \chi_2) \right], \quad (8)$$

$$N_y = G_2 \left[ (h + F_y)(\varepsilon_y + \mu_1 \varepsilon_x) + S_y(\chi_2 + \mu_1 \chi_1) \right], \quad (9)$$

$$N_{xy} = G_{12} \left[ (h + F_y) \gamma_{xy} + 2S_y \chi_{12} \right], \quad (10)$$

$$N_{xy} = G_{12} \left[ (h + F_x) \gamma_{xy} + 2S_x \chi_{12} \right], \quad (11)$$

$$N_{yx} = G_{12} \left[ (h + F_x) \gamma_{xy} + 2S_x \chi_{12} \right], \quad (12)$$

$$M_x = G_1 \left[ S_x(\varepsilon_x + \mu_2 \varepsilon_y) + \left( \frac{h^3}{12} + J_x \right) (\chi_1 + \mu_2 \chi_2) \right], \quad (13)$$

$$M_y = G_2 \left[ S_y(\varepsilon_y + \mu_1 \varepsilon_x) + \left( \frac{h^3}{12} + J_y \right) (\chi_2 + \mu_1 \chi_1) \right], \quad (14)$$

$$M_{xy} = G_{12} \left[ S_y \gamma_{xy} + 2 \left( \frac{h^3}{12} + J_y \right) \chi_{12} \right], \quad (15)$$

$$M_{yx} = G_{12} \left[ S_x \gamma_{xy} + 2 \left( \frac{h^3}{12} + J_x \right) \chi_{12} \right], \quad (16)$$

$$Q_x = G_{13} k (h + F_x) (\psi_x - \theta_1), \quad (17)$$

$$Q_y = G_{23} k (h + F_y) (\psi_y - \theta_2), \quad (18)$$

где  $F_x = F_x(x, y)$ ,  $F_y = F_y(x, y)$ ,  $S_x = S_x(x, y)$ ,  $S_y = S_y(x, y)$ ,  $J_x = J_x(x, y)$ ,  $J_y = J_y(x, y)$  - площадь поперечного сечения или продольного сечения ребра, приходящаяся на единицу длины сечения; статический момент и момент инерции этого сечения, являющиеся функциями координат  $x$ ,  $y$ . Для оболочек произвольного вида приведенные жёсткостные характеристики рёбер представляются в виде:

$$F_x = \sum_{i=1}^n \frac{h^i r_i}{b} + \sum_{j=1}^m \left( \frac{h^j r_j}{a} - \sum_{i=1}^n \frac{h^{ij} r_i r_j}{ab} \right) \frac{r_j}{a}, \quad (19)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^n \frac{h^i r_i}{a} + \sum_{j=1}^m \left( \frac{h^j r_j}{b} - \sum_{i=1}^n \frac{h^{ij} r_i r_j}{ab} \right) \frac{r_i}{b}, \quad (20)$$

$$S_x = \sum_{i=1}^n \frac{S^i r_i}{b} + \sum_{j=1}^m \left( \frac{S^j r_j}{a} - \sum_{i=1}^n \frac{S^{ij} r_i r_j}{ab} \right) \frac{r_j}{a}, \quad (21)$$

$$S_y = \sum_{j=1}^m \frac{S^j r_j}{a} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{S^i r_i}{b} - \sum_{j=1}^m \frac{S^{ij} r_i r_j}{ab} \right) \frac{r_i}{b}, \quad (22)$$

$$J_x = \sum_{i=1}^n \frac{J^i r_i}{b} + \sum_{j=1}^m \left( \frac{J^j r_j}{a} - \sum_{i=1}^n \frac{J^{ij} r_i r_j}{ab} \right) \frac{r_j}{a}, \quad (23)$$

$$J_y = \sum_{j=1}^m \frac{J^j r_j}{\bar{a}} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{J^i r_i}{\bar{b}} - \sum_{j=1}^m \frac{J^{ij} r_i r_j}{\bar{a}\bar{b}} \right) \frac{r_i}{b}, \quad (24)$$

Здесь  $r$  – ширина ребра;  $h$  – высота ребра; индексы  $i, j$  указывают на номер ребра, расположенного параллельно осям  $x$  и  $y$  соответственно;  $n, m$  – количество рёбер; переменные  $\bar{a}, \bar{b}$  позволяют рёбрам жёсткости повторять геометрию оболочки и определяются как  $\bar{a} = aA, \bar{b} = (y_2(x) - y_1(x))B \left( \frac{a}{2} \right)$ .

- 2) **Цилиндрическая панель, подкреплённая продольным набором.**
- 3) **Подкреплённая прямоугольная пластина**

Предполагается, что подкрепляющие элементы (стрингеры, шпангоуты) также могут быть изготовлены из ПКМ. Свойства материала монослоёв обшивки и подкрепляющих элементов соответствуют ортотропному материалу. В частных случаях вышеуказанные объекты рассмотрены без подкреплений.

## 2.2 Описание дефектов

В работе рассматриваются межслоевые дефекты произвольной формы  $D$  (рисунок 2), граница  $\Gamma$  которых аппроксимируется набором прямых

$L_i (i = 1, \dots, N - 1)$ , которые определяются координатами узлов  $K_i(x^i, y^i), i = 1, \dots, N$ .

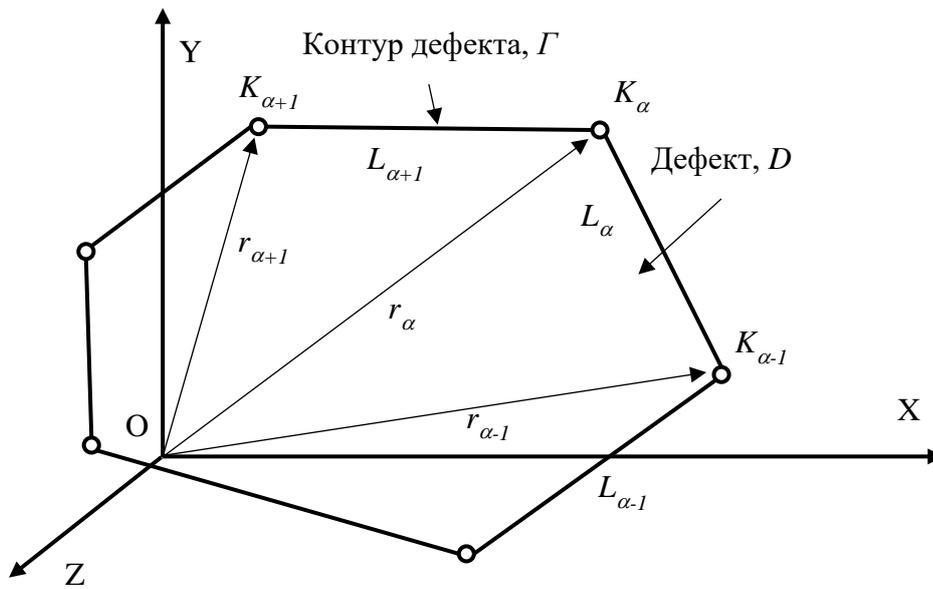


Рис. 2 – Геометрия дефекта произвольной формы

Для узла  $K_i$  введён радиус-вектор  $r_i$ . Тогда граница  $\Gamma$  области  $D$  представляется следующим образом:

$$\Gamma = \partial D = \bigcup_i^{N-1} L_i, L_i : r = (\alpha - 1)r_i + \alpha r_{i+1}, \alpha \in [0, 1] \quad (25)$$

Для примера, на рисунке 3 показано расположение дефектов с границами  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  в обшивке цилиндрической оболочки.

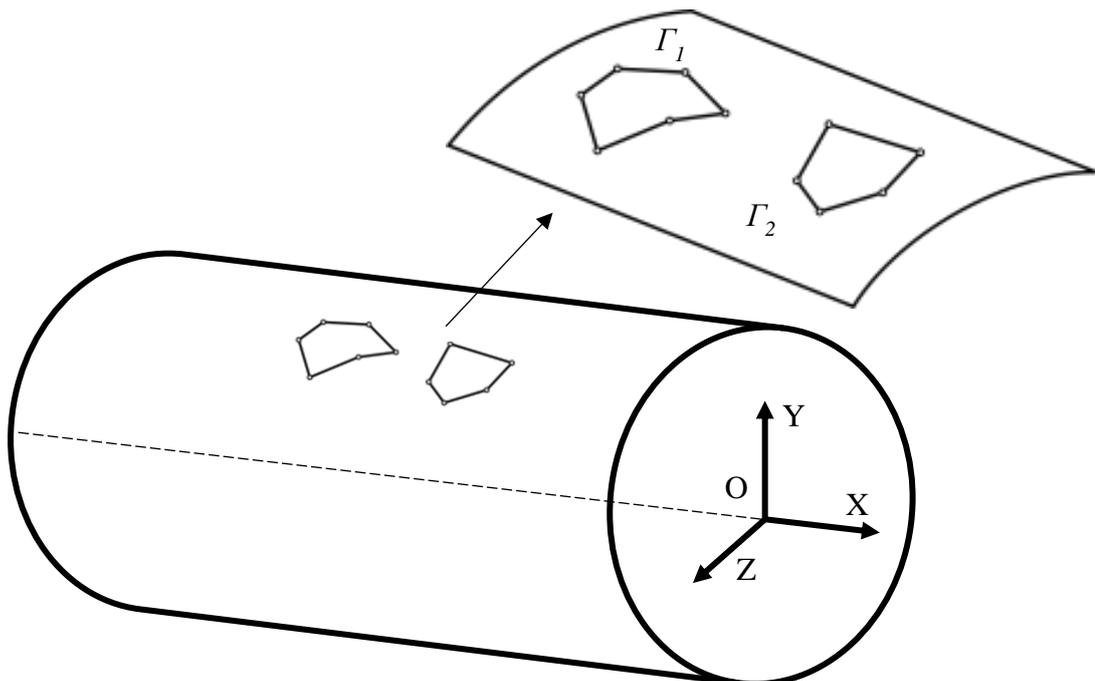


Рис. 3 – Расположение дефектов в обшивке оболочки

Рассматриваются случаи расположения дефектов между монослоями обшивки оболочки или панели и между стрингером и обшивкой (рисунок 4).

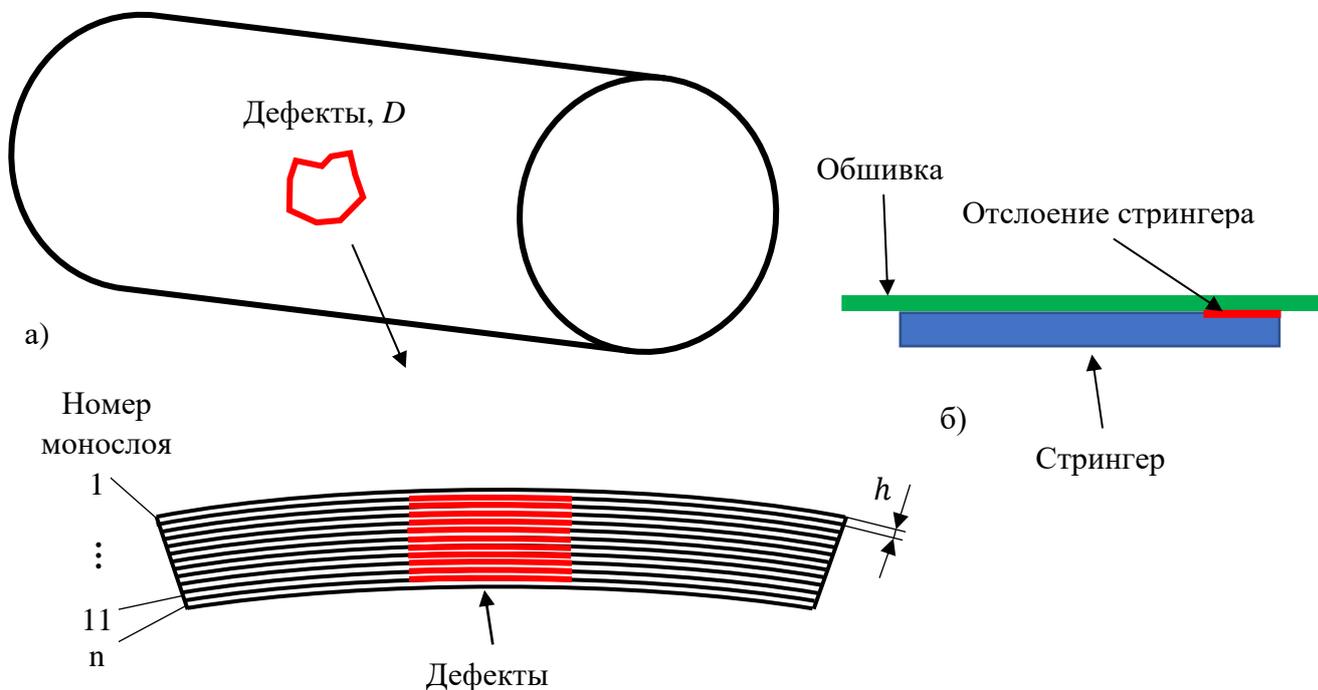


Рис. 4 – Случаи расположения дефектов

а) – дефекты между монослоями; б) – отслоение силовых элементов

### 3. Методика исследования

Для изучения поведения элементов конструкций при наличии межслоевых дефектов предлагается использовать следующий алгоритм:

а) моделирование каждого монослоя композитного пакета (КП) отдельным набором конечных элементов;

б) соединение слоёв конечных элементов с помощью клеевого контакта, за исключением зон, где располагаются дефекты. В зонах дефектов учитывается односторонний контакт [5];

в) задание соответствующих свойств материала и направления укладки, приложение нагрузки и граничных условий к модели;

г) проведение расчётов и получение необходимых результатов (в программном комплексе LS-DYNA);

д) определение наиболее нагруженного слоя, вычисление индексов разрушения и коэффициентов запаса прочности для исследуемой области в различные моменты времени; определение динамики развития дефектов.

е) определение динамики развития дефектов.

Методика реализована в программном комплексе, разработанном на языке Visual Basic. Интерфейс комплекса представлен на рисунке 5.

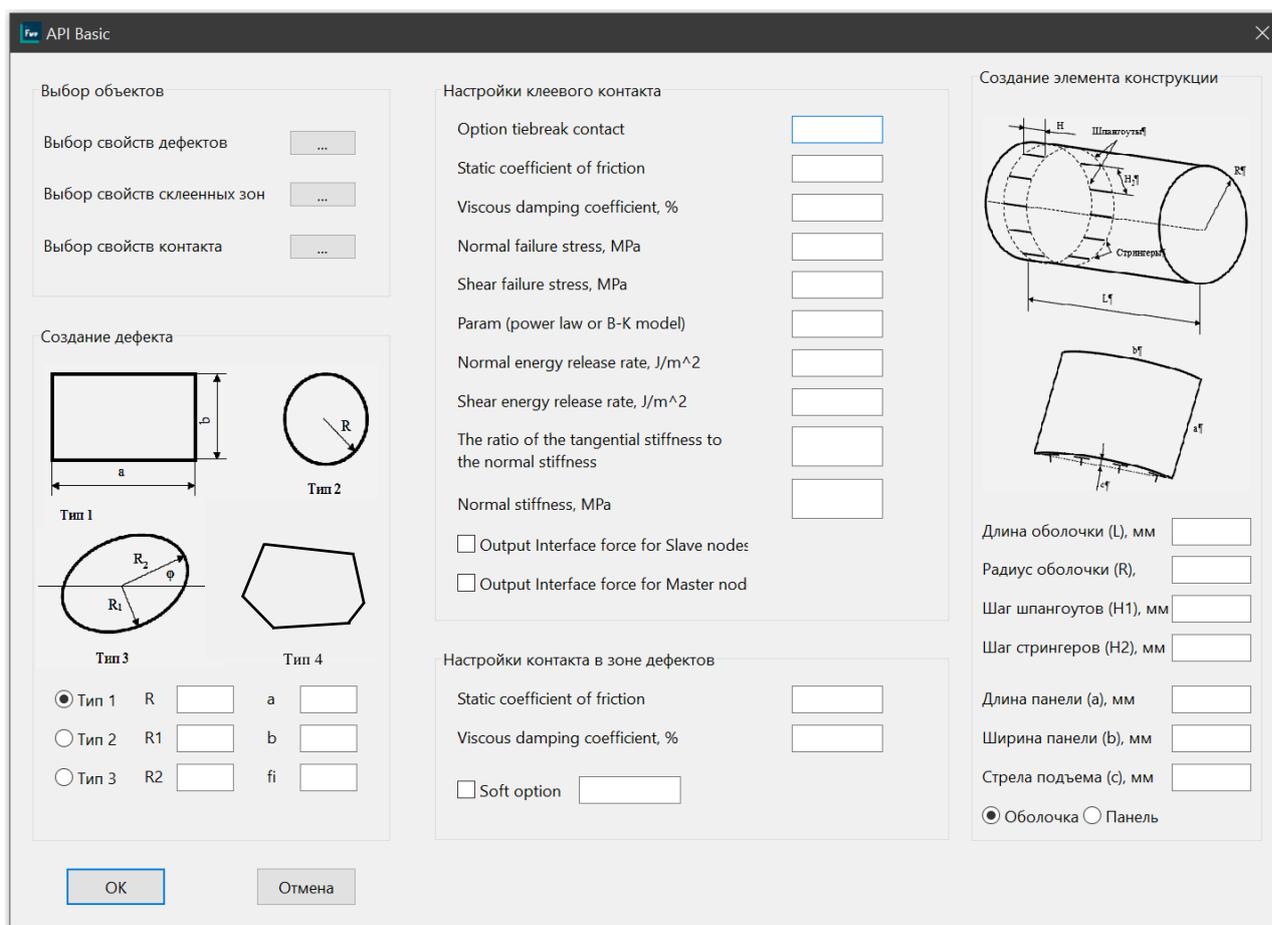


Рис. 5 – Интерфейс программы

Программный комплекс предполагает создание послойной конечно-элементной модели (КЭМ) с возможностью выбора типа элемента конструкции (пластина, панель, оболочка), задания её геометрических параметров (габаритные размеры, шаг и форма поперечного сечения подкрепляющих элементов), выбор формы, размеров и расположения дефектов, задание свойств клеевого контакта между слоями, а также задание свойств монослоя и формата укладки КП.

В качестве метода решения задач динамики элементов конструкций используется метод конечных элементов (МКЭ). При решении задач динамики в программном комплексе LS-DYNA используется метод центральных разностей [6].

Для моделирования межслоевого взаимодействия в LS-DYNA используется контакт «AUTOMATIC\_ONE\_WAY\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK» с опцией, соответствующей модели материала когезионной связи (интерфейс) «MAT\_COHESIVE\_MIXED\_MODE», который моделирует взаимодействие монослоёв с возможностью разрушения [7]. Эта модель реализует билинейное описание поведения материала с использованием смешанного квадратичного критерия расслоения. Относительное перемещение интерфейса задаётся следующим образом:

$$\delta_m = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_{II}^2}, \quad (26)$$

$$\delta_{II} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}, \quad (27)$$

где  $\delta_I = \delta_3$  – перемещения в нормальном направлении,  $\delta_{II} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}$  – перемещения в касательном направлении.

Критерий начала деградации клеевого контакта (интерфейса) по перемещениям имеет следующий вид:

$$\delta^0 = \delta_I^0 \delta_{II}^0 \sqrt{\frac{1 + \beta^2}{(\delta_{II}^0)^2 + (\beta \delta_I^0)^2}}, \quad (28)$$

где  $\beta = \frac{\delta_{II}}{\delta_I}$ ,  $\delta_I^0 = \frac{T}{EN}$ ,  $\delta_{II}^0 = \frac{S}{ET}$ ,  $T$  – максимальные напряжения в нормальном направлении,  $S$  – максимальные напряжения в касательном направлении,  $EN$  – жёсткость материала в нормальном направлении,  $ET$  – жёсткость материала в касательном направлении.

Критерий полного разрушения имеет следующий вид:

$$\delta^F = \frac{2(1 + \beta^2)}{\delta^0} \left[ \left( \frac{EN}{G_{1c}} \right)^n + \left( \frac{ET \cdot \beta^2}{G_{2c}} \right)^n \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (29)$$

где  $G_{1c}$  – энергия разрушения при нормальном отрыве,  $G_{2c}$  – энергия разрушения при плоском сдвиге,  $n$  – степень уравнения ( $n = 2$ );  $G_{1c}$  и  $G_{2c}$  – являются характеристиками материала и получены экспериментально производителем ПКМ.

Для оценки прочности монослоёв используются следующие критерии разрушения для ПКМ: Hashin [8], Chang-Chang [9], Puck [10], LaRC (Langley Research Center) [11].

#### 4. Внешние нагрузки

В качестве внешних нагрузок рассматривается действие взрывной волны сферической формы [12]-[13] и ударное воздействие (с использованием различных видов ударников) [14].

#### 4.1 Действие взрывной сферической волны

Давление от волны определяется по закону:

$$p(t) = p_{\max} \left[ 1 - \frac{t - T_a}{T_0} \right] \exp \left[ \frac{-A \times (t - T_a)}{T_0} \right], \quad (30)$$

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

#### 4.2 Ударное воздействие

В качестве ударников (импакторов) в работе рассматриваются:

а) Абсолютно жёсткий полусферический ударник.

б) Резиноподобные множественные параллелепипеды (имитация соударения конструкции с фрагментом разорвавшейся шины колеса шасси самолёта при его движении по взлётно-посадочной полосе аэродрома).

в) Град шарообразной формы.

В таблице 2 приведено описание ударников.

Таблица 2 – Описание ударников

Вид ударника	Форма	Масса, кг	Направление скорости
Абсолютно жёсткий	Полусферическая, радиус 9.38 мм	0.5	Вектор скорости совпадает с направлением нормали к поверхности в точке соударения
Фрагмент пневматика	Прямоугольный параллелепипед, 20 × 20 × 50 мм	0.0225	
Град	Сферическая, радиус 20 мм	0.03	

#### 5. Характеристики используемого материала

Элементы конструкции выполнены из ПКМ. Укладки КП симметричные, сбалансированные и смешанные со следующими углами:  $\pm 45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ . Физико-механические характеристики монослоёв ПКМ представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Физико-механические характеристики материала монослоёв

Величина	Название материала
	HexPly M21/34%/UD194/IMA (углелента)
$E_1$ , модуль упругости в продольном направлении (МПа)	178
$E_2$ , модуль упругости в поперечном направлении (МПа)	8.6
$G_{12}$ , модуль упругости при сдвиге в плоскости листа (МПа)	3000
$\mu$ , коэффициент Пуассона	0.32
$\rho$ , плотность ( $т/мм^3$ )	$1.5 \cdot 10^{-9}$
$X_t$ , предел прочности в продольном направлении при растяжении (МПа)	2830
$X_c$ , предел прочности в продольном направлении при сжатии (МПа)	1500
$Y_t$ , предел прочности в поперечном направлении при растяжении (МПа)	54
$Y_c$ , предел прочности в поперечном направлении при сжатии (МПа)	271
$S_{12}$ , предел прочности при сдвиге в плоскости листа (МПа)	96
$G_{1C}$ – энергия разрушения при нормальном отрыве, $G_{2C}$ – энергия разрушения при плоском сдвиге ( $Дж/мм^2$ )	0.25
$h$ , толщина монослоя (мм)	0.184...0.19

Приведённые механические характеристики соответствуют режиму испытаний RTD (Root Temperature Dry) – испытания композитов при комнатной температуре  $+23^{\circ}C$  и влажности в состоянии поставки (состояние, в котором находятся образцы сразу после изготовления, содержание влаги в них не превышает 10% от максимального влагонасыщения при относительной влажности 85%). Данные получены от производителя ПКМ.

## 6. Результаты математического моделирования

### 6.1 Пологая цилиндрическая подкреплённая панель

Рассматривается цилиндрическая подкреплённая панель. Длина панели  $a = 750$  мм, ширина  $b = 490$  мм, стрела подъёма  $c = 7.38$  мм. Схема укладки обшивки:  $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$ . Четыре стрингера Т-образного сечения (высота стенки 37 мм, суммарная ширина полок 61 мм), формат укладки стрингеров:  $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$ . Панель шарнирно опёрта вдоль длинных кромок.

Изучаются два случая расположения дефектов:

а) эллиптические дефекты в межстрингерной зоне (с осями 36 и 26 мм) между всеми слоями обшивки (рисунок 6);

б) прямоугольный дефект в подстрингерной зоне, а именно – отслоение полки стрингера от обшивки панели (рисунок 7). Площадь отслоения полки 2497 мм<sup>2</sup>.

КЭМ содержит 446253 элемента и 465634 узла.

### **6.1.1 Действие взрывной волны**

Энергия взрыва  $E = 209.2$  кДж, волна имеет сферическую форму. Эпицентр взрыва расположен на расстоянии 500 мм от внешней поверхности панели. На рисунке 6 показано распределение коэффициента запаса по критерию Puck (минимальный запас среди рассматриваемых критериев) в слое №4 (90°) в момент времени 0.22 мс в области расположения дефектов.

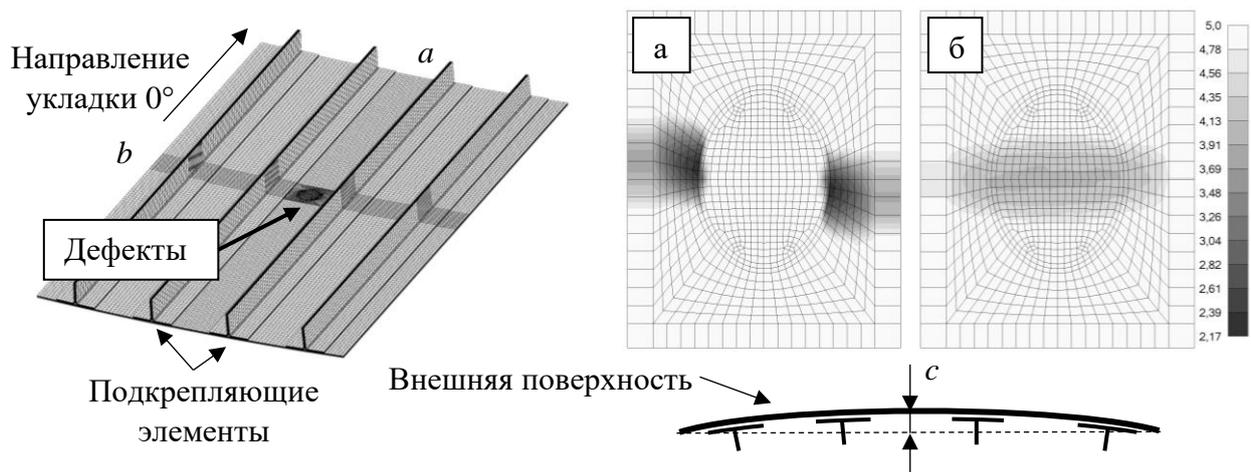


Рис. 6 – Распределение коэффициента запаса прочности в слое №4 (90°) в момент времени 0.22 мс: а – с дефектами, б – без дефектов

### 6.1.2 Ударное воздействие

На рисунке 7 показана схема нанесения последовательных (независимо друг от друга) ударов жёстким полусферическим ударником по подкреплённой панели.

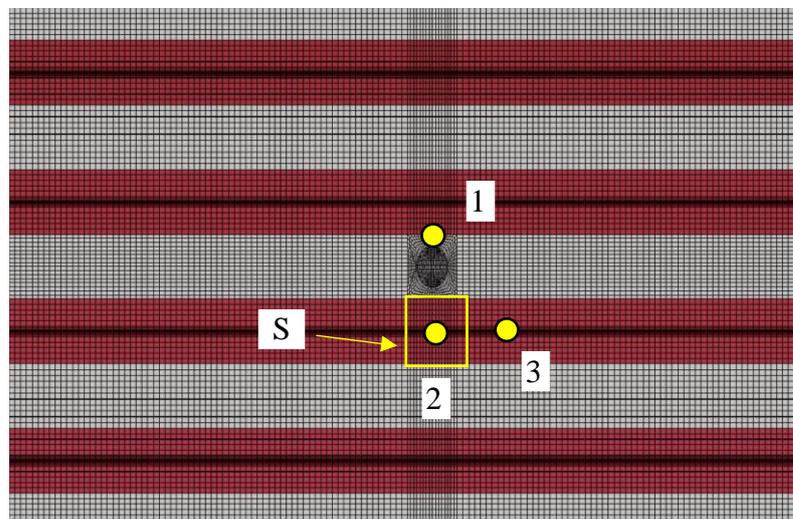


Рис. 7 – Схема нанесения ударов по подкреплённой панели (S – область отслоения стрингера от обшивки панели)

Скорость соударения в точке 1 составляет 5 м/с, в точках 2 и 3 – 8 м/с.

На рисунке 8 представлено изменение площади расслоения в слоях обшивки панели при ударе в точку 1 при наличии и отсутствии межслоевых дефектов

эллиптической формы в межстрингерной зоне (сплошные линии соответствуют конструкции без дефектов, пунктирные линии соответствуют конструкции при наличии дефектов).

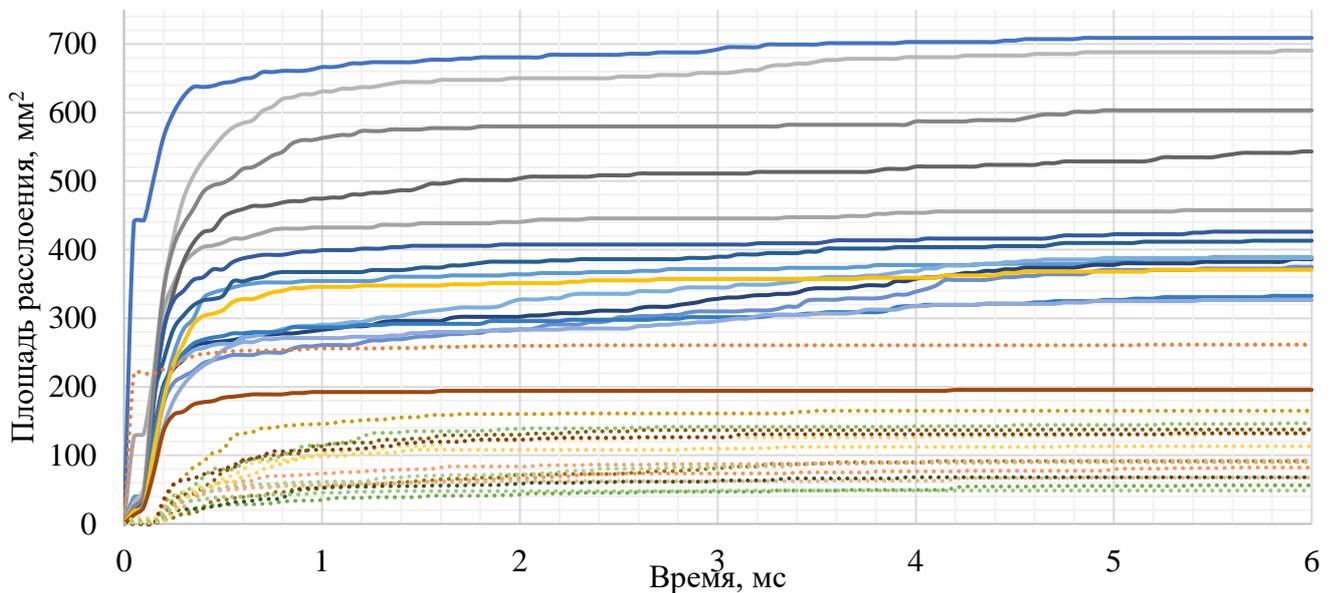


Рис. 8 – Изменение площади расслоения в слоях обшивки панели

Из рисунка 8 следует, что максимальная площадь расслоения (между слоями №1-2) для случая отсутствия дефектов составляет 709 мм<sup>2</sup>. В случае наличия дефектов в межстрингерной зоне, расслоение между слоями №1-2 увеличилось на 27%. На рисунке 9 показано изменение площади расслоения в случае наличия и отсутствия расслоения в подстрингерной зоне (рисунок 7) для точек 2 и 3.

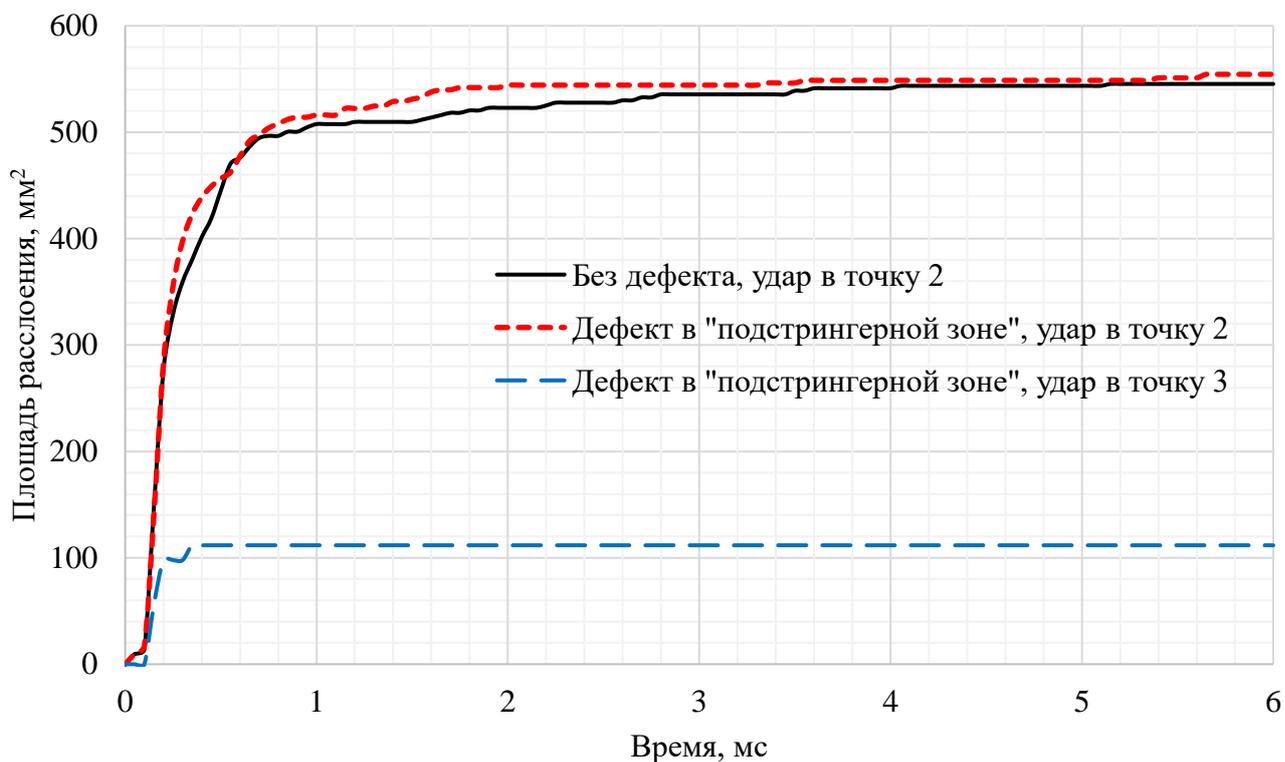


Рис. 9 – Изменение площади расслоения в подстрингерной зоне

Из рисунка 9 следует, что при нанесении удара в точку 2, т.е. в место расположения отслоения стрингера, наблюдается увеличение площади отслоения на 18.2%. При нанесении удара в точку 3 отслоение увеличивается на 4.3%.

## 6.2 Цилиндрическая подкреплённая оболочка

Рассматривается подкреплённая цилиндрическая оболочка длиной  $L = 800$  мм и радиусом  $R = 200$  мм (рисунок 10). Схема укладки оболочки (обшивки и подкрепляющих элементов):  $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$ . В качестве продольных подкрепляющих элементов используются стрингеры, которые имеют Т-образное сечение (11×14 мм), в качестве поперечных элементов – швеллер (20×6 мм). Подкрепляющие элементы изготовлены из того же материала, что и обшивка. Граничные условия – шарнирное опирание по торцам оболочки. КЭМ содержит 330283 элемента и 336380 узлов.

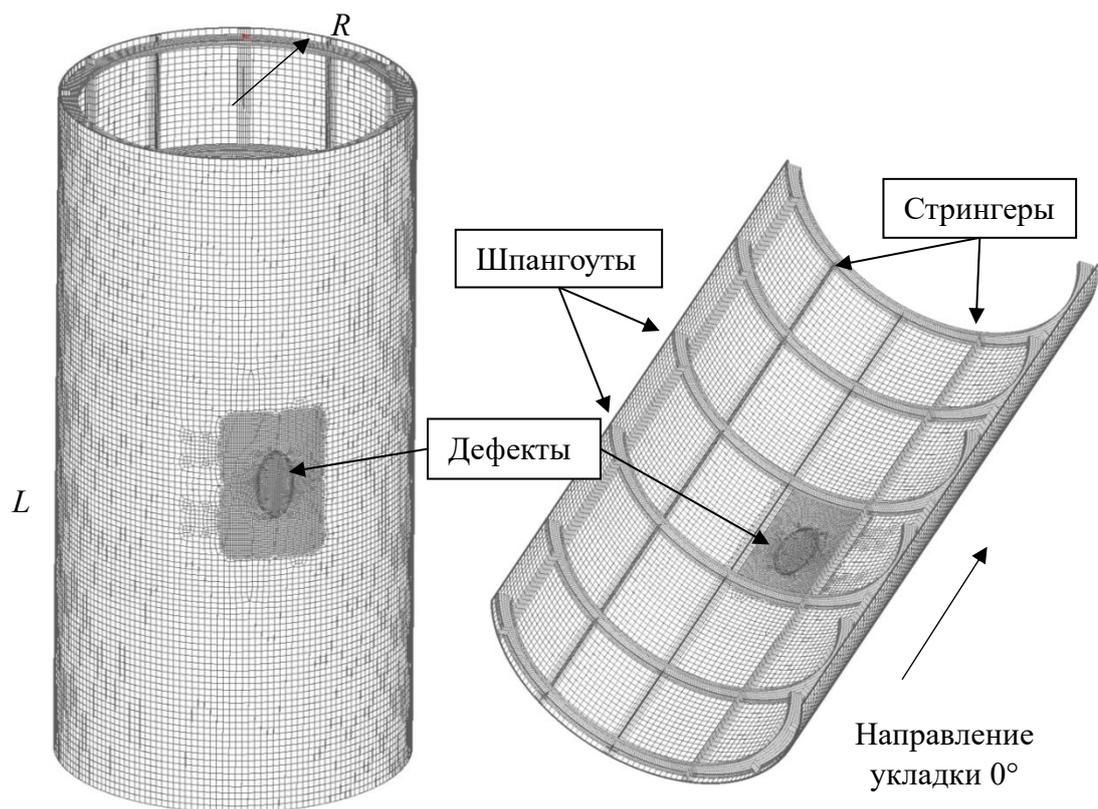


Рис. 10 – КЭМ подкреплённой цилиндрической оболочки при наличии дефектов эллиптической формы в обшивке оболочки

Рассматриваются три вида дефектов:

- а) эллиптические дефекты с осями 90 и 45 мм в межстрингерной зоне между всеми слоями обшивки (площадь дефекта 3180 мм<sup>2</sup>);
- б) дефект произвольной формы (площадь дефекта 2209 мм<sup>2</sup>);
- в) прямоугольный дефект в подстрингерной зоне, а именно – отслоение полки стрингера от обшивки панели (площадь дефекта 401.5 мм<sup>2</sup>).

### 6.2.1 Удар жёстким ударником в случае наличия эллиптических дефектов в обшивке

Удар наносится жёстким полусферическим ударником в центр расположения дефектов. Энергии удара 160 Дж и 62.5 Дж.

На рисунке 11 показано состояние модели в различные моменты времени при ударном воздействии.

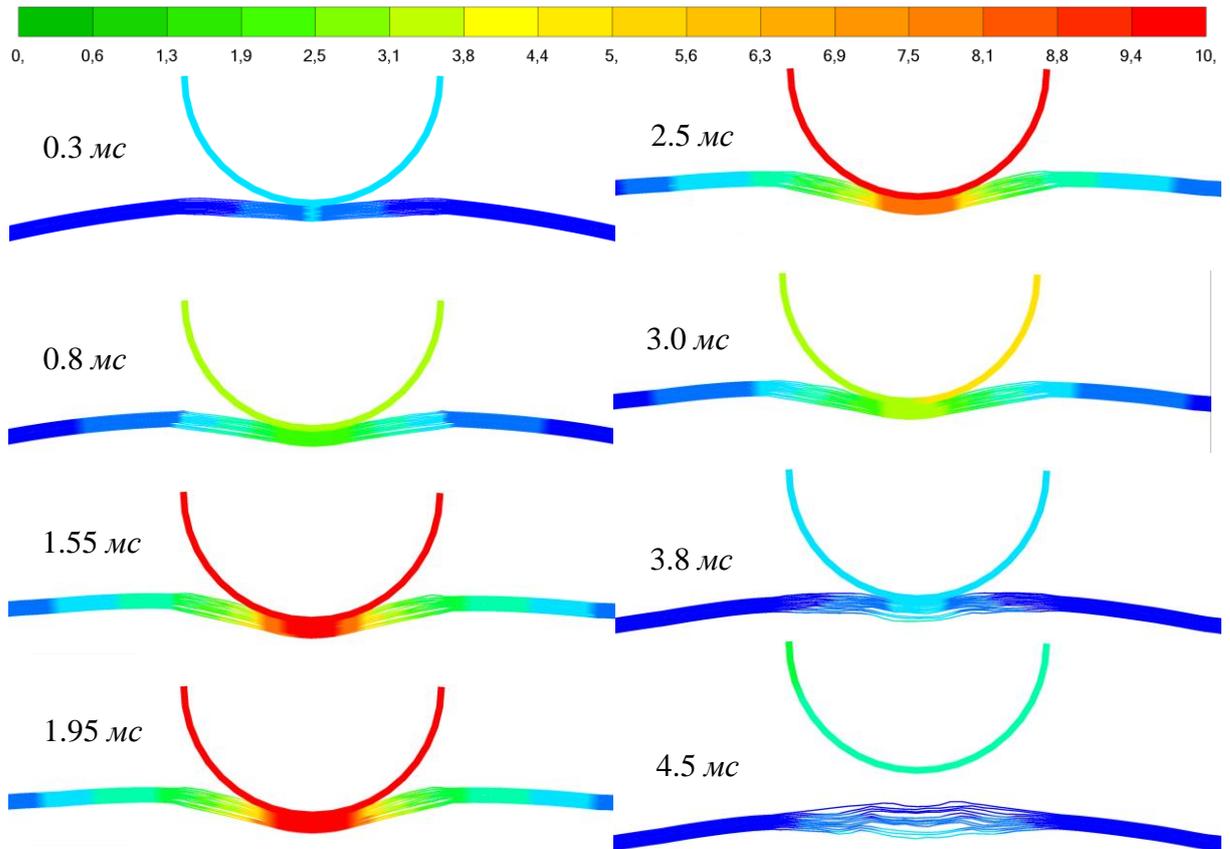


Рис. 11 – Полные перемещения в зоне удара, мм

На рисунке 12 представлено изменение прогибов обшивки в точке удара для оболочки с дефектами и без дефектов.

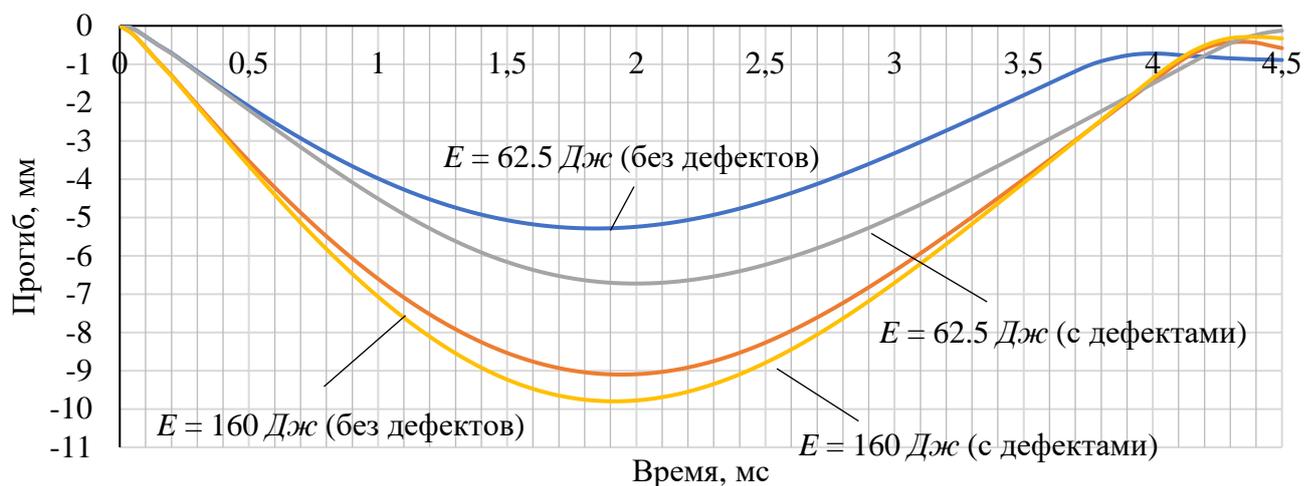


Рис. 12 – Изменения прогиба в точке соударения

На рисунке 13 дано состояние клеевого интерфейса между слоями №4-5 в различные моменты времени для случаев наличия и отсутствия дефектов.

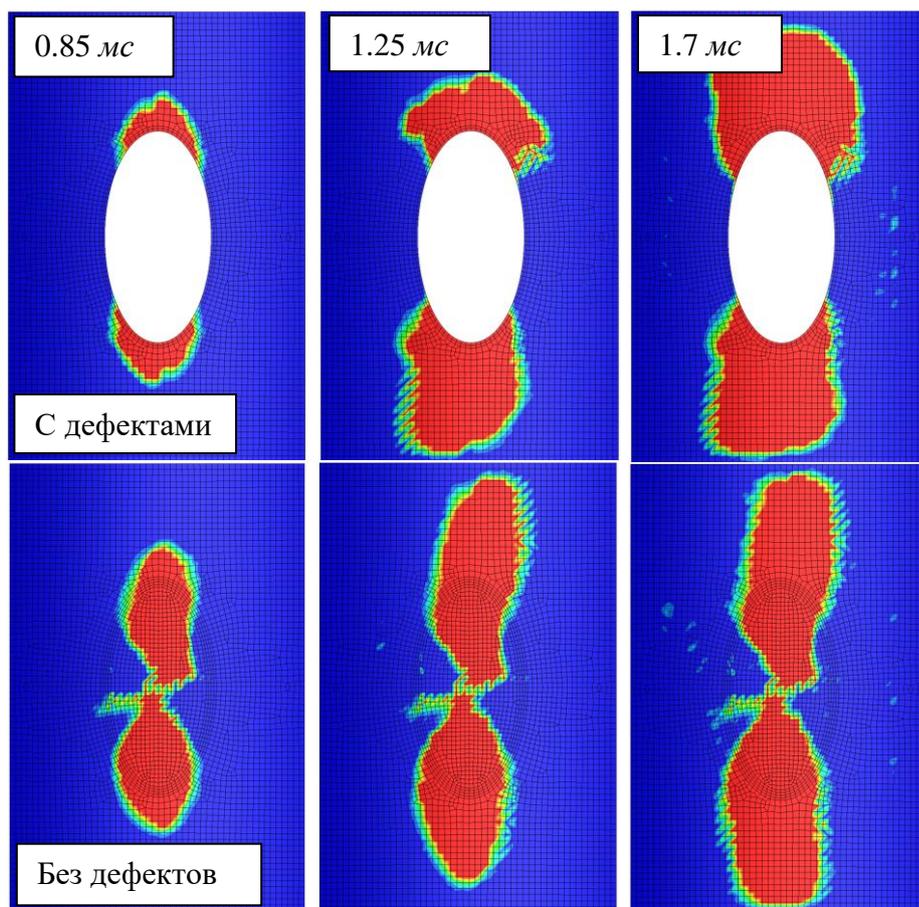


Рис. 13 – Развитие зоны расслоения ( $E = 160$  Дж)

Площадь расслоения в случае наличия дефектов увеличилась в 1.57 раз.

## 6.2.2 Удар жёстким ударником в случае наличия дефектов произвольной формы в обшивке

На рисунке 14 показана схема нанесения ударов жёстким полусферическим ударником по подкреплённой оболочке при наличии дефектов произвольной формы в обшивке оболочки.

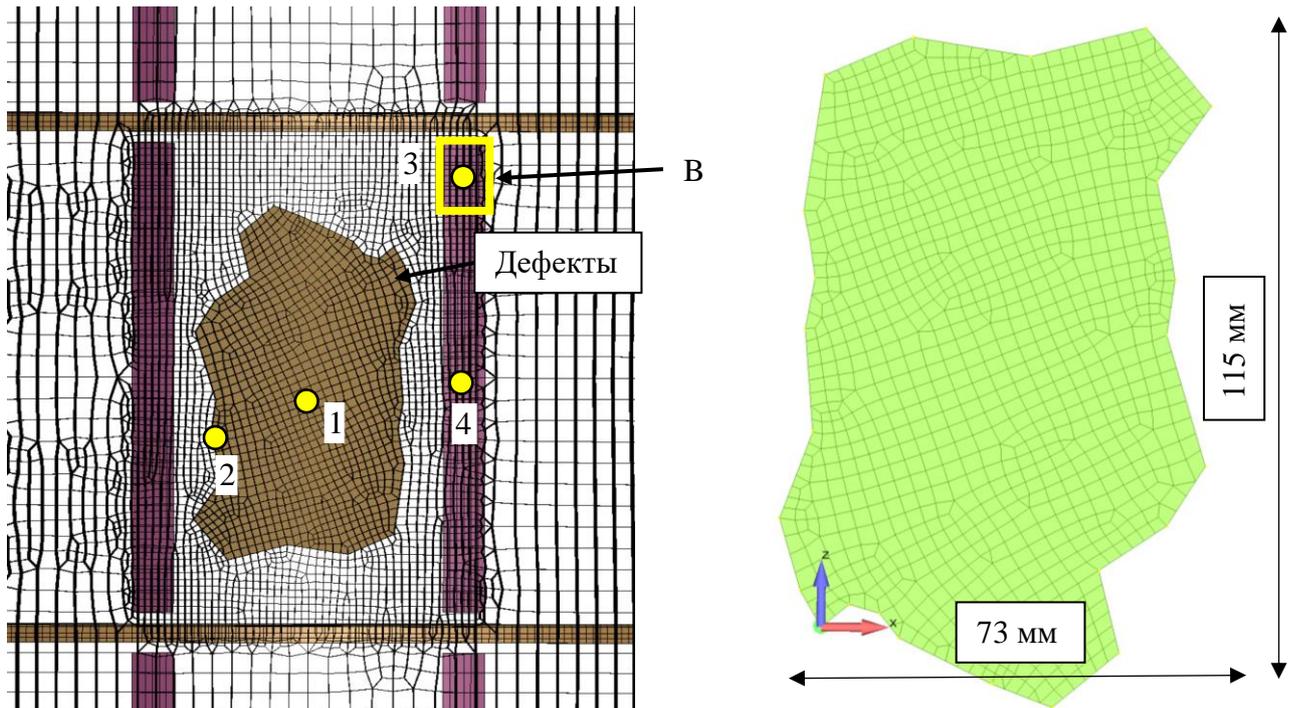


Рис. 14 – Схема нанесения ударов по подкреплённой оболочке  
(В – зона отслоения стрингера от обшивки оболочки)

На рисунке 15 представлено изменение площади расслоения между слоями №6-7.

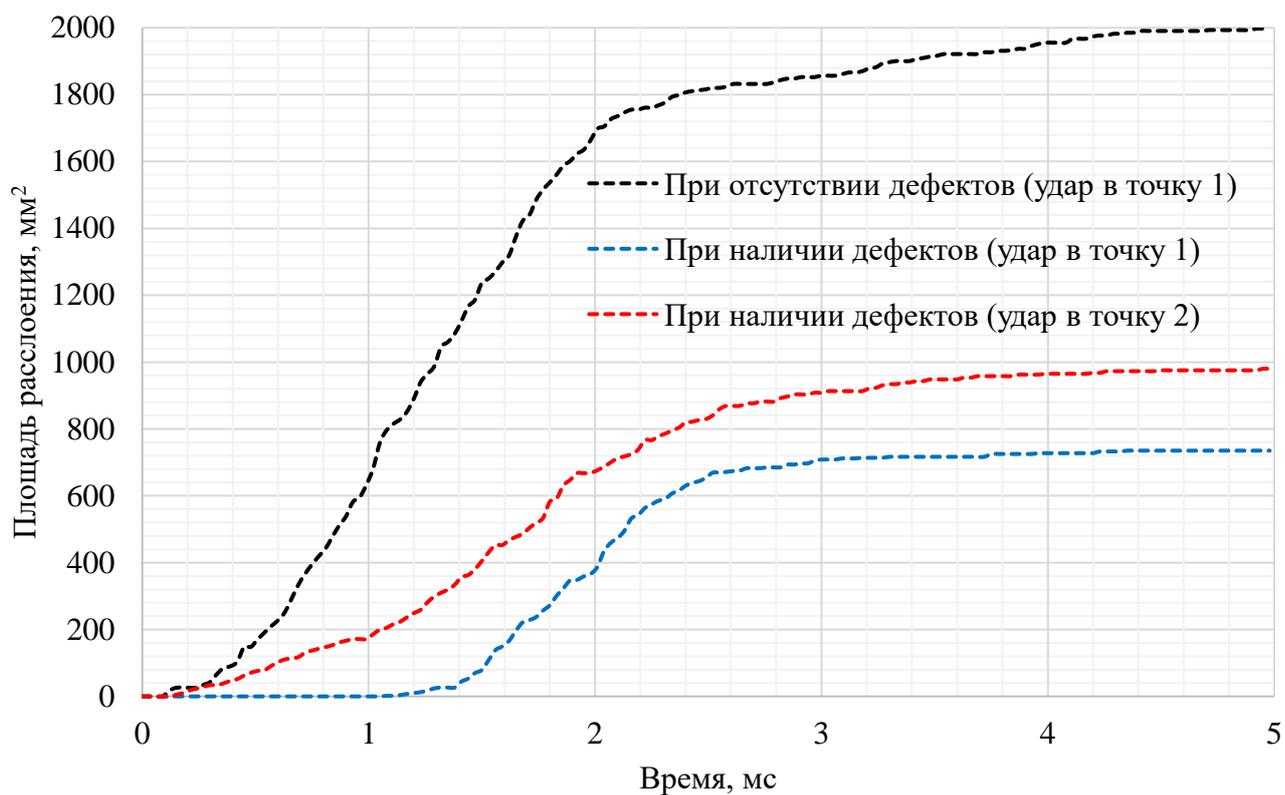


Рис. 15 – Изменение площади расслоения в обшивке оболочки

Из рисунка 15 следует, что площадь расслоения между слоями №6-7 увеличивается на 10% при ударе в точку 1, а при ударе в точку 2 – на 12.9%.

На рисунке 16 показано изменение площади отслоения стрингера от обшивки оболочки.

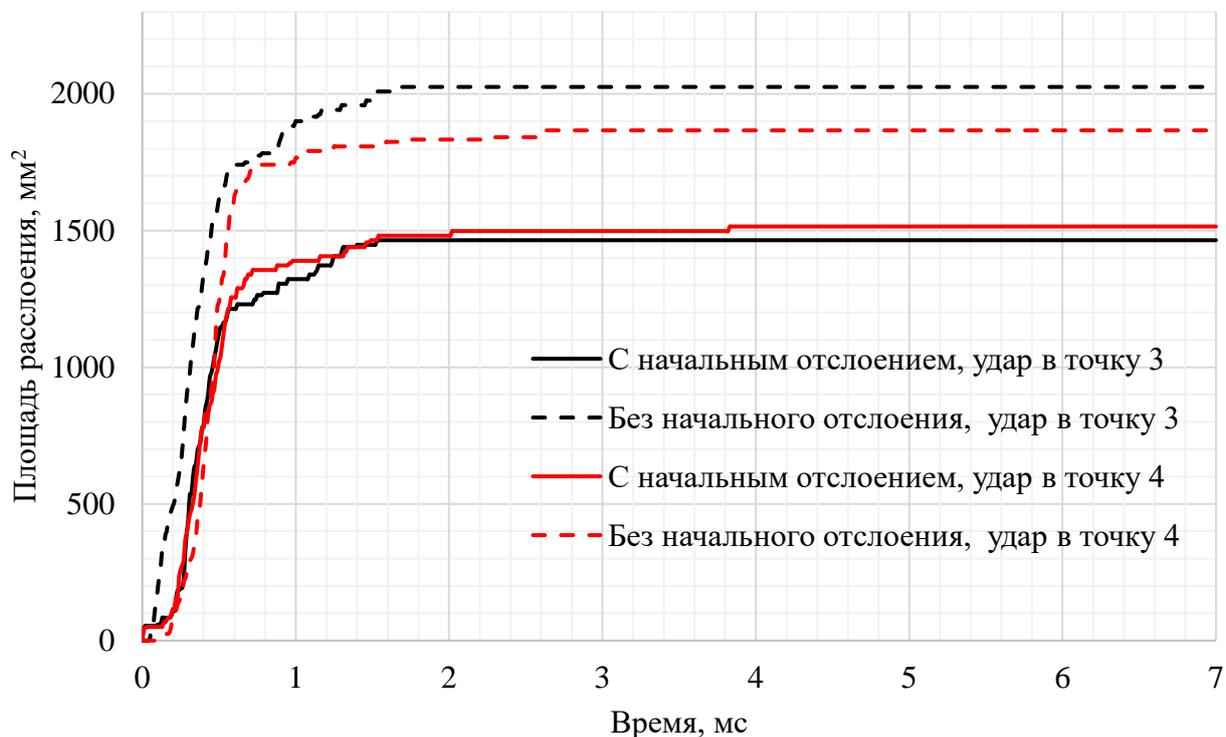


Рис. 16 - Изменение площади отслоения стрингера

Из рисунка 16 следует, что площадь отслоения стрингера увеличивается в 3.63 раза при ударе в точку 3. При ударе в точку 4 площадь отслоения стрингера увеличивается в 3.76 раза.

### 6.2.3 Удар фрагментами пневматика

Рассматривается ударное воздействие множественными фрагментами пневматика. Скорость каждого фрагмента составляет 10 м/с. Для моделирования используется модель материала «077\_O-OGDEN\_RUBBER» (данная модель позволяет описывать поведение гиперупругих материалов, таких как каучуки, полимеры и биологические ткани) и объёмные конечные-элементы гексагональной формы [16].

На рисунке 17 дано положение пяти фрагментов пневматика. Фрагменты имеют одинаковую массу и направление вектора скорости.

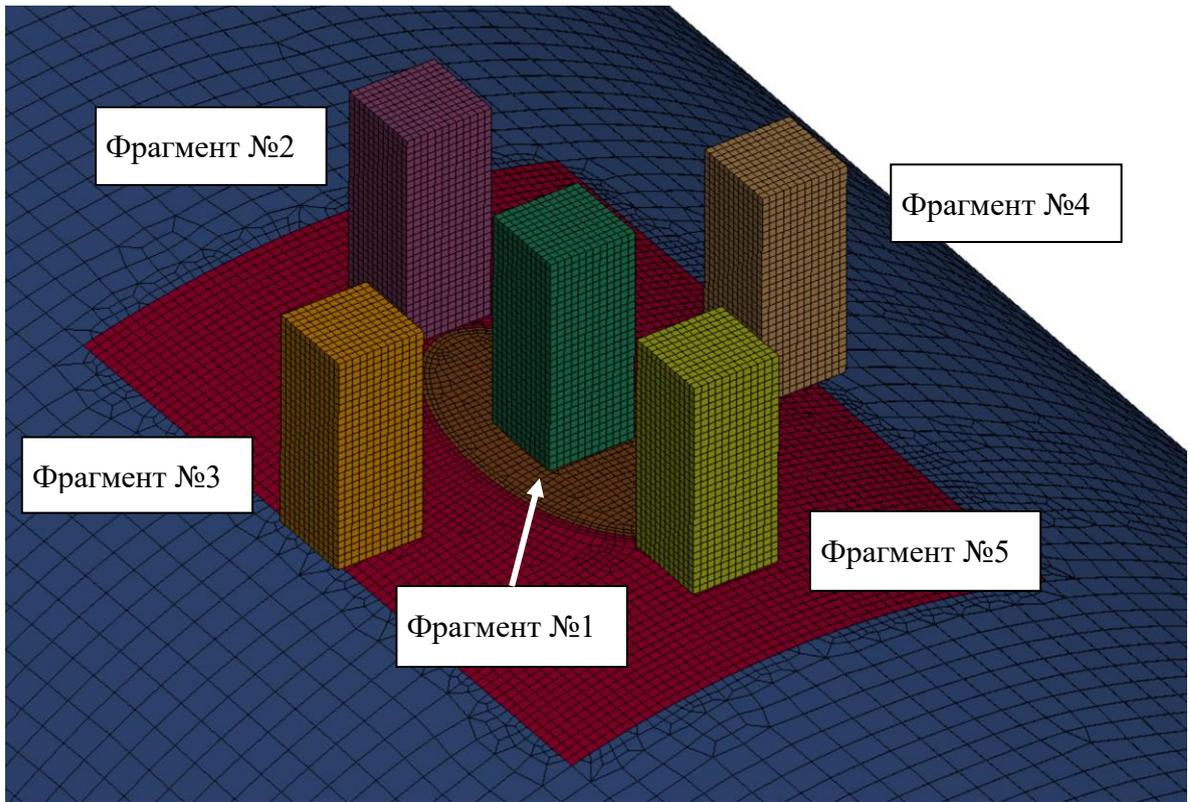


Рис. 17 – КЭМ фрагментов пневматика

На рисунке 18 представлено состояние модели в различные моменты времени в зоне удара фрагмента №1 (вектор скорости направлен перпендикулярно внешней поверхности оболочки в центр расположения дефектов).

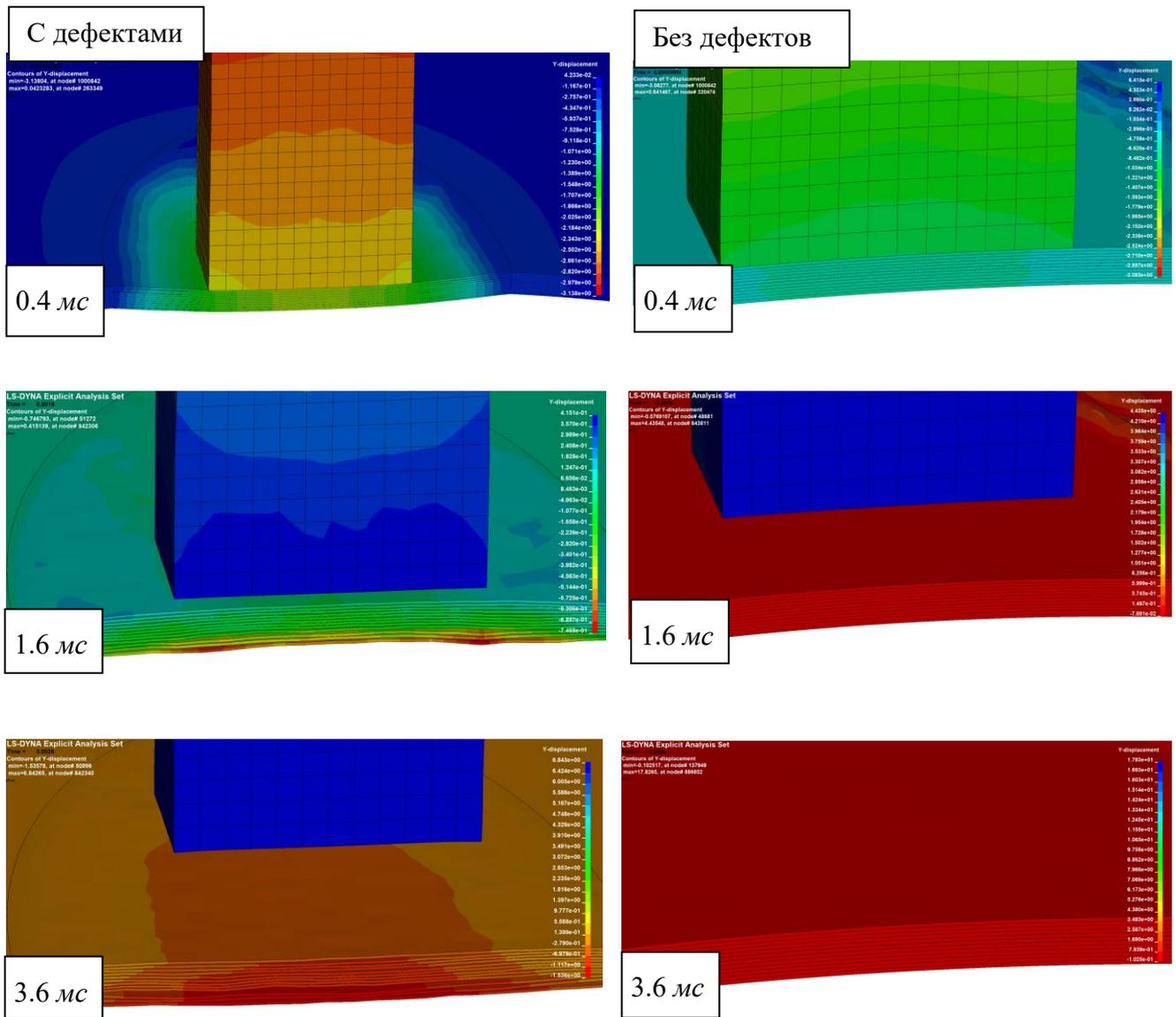


Рис. 18 – Состояние модели в различные моменты времени в зоне удара фрагмента №1

На рисунке 19 показано состояние конструкции в центральном сечении в различные моменты времени.

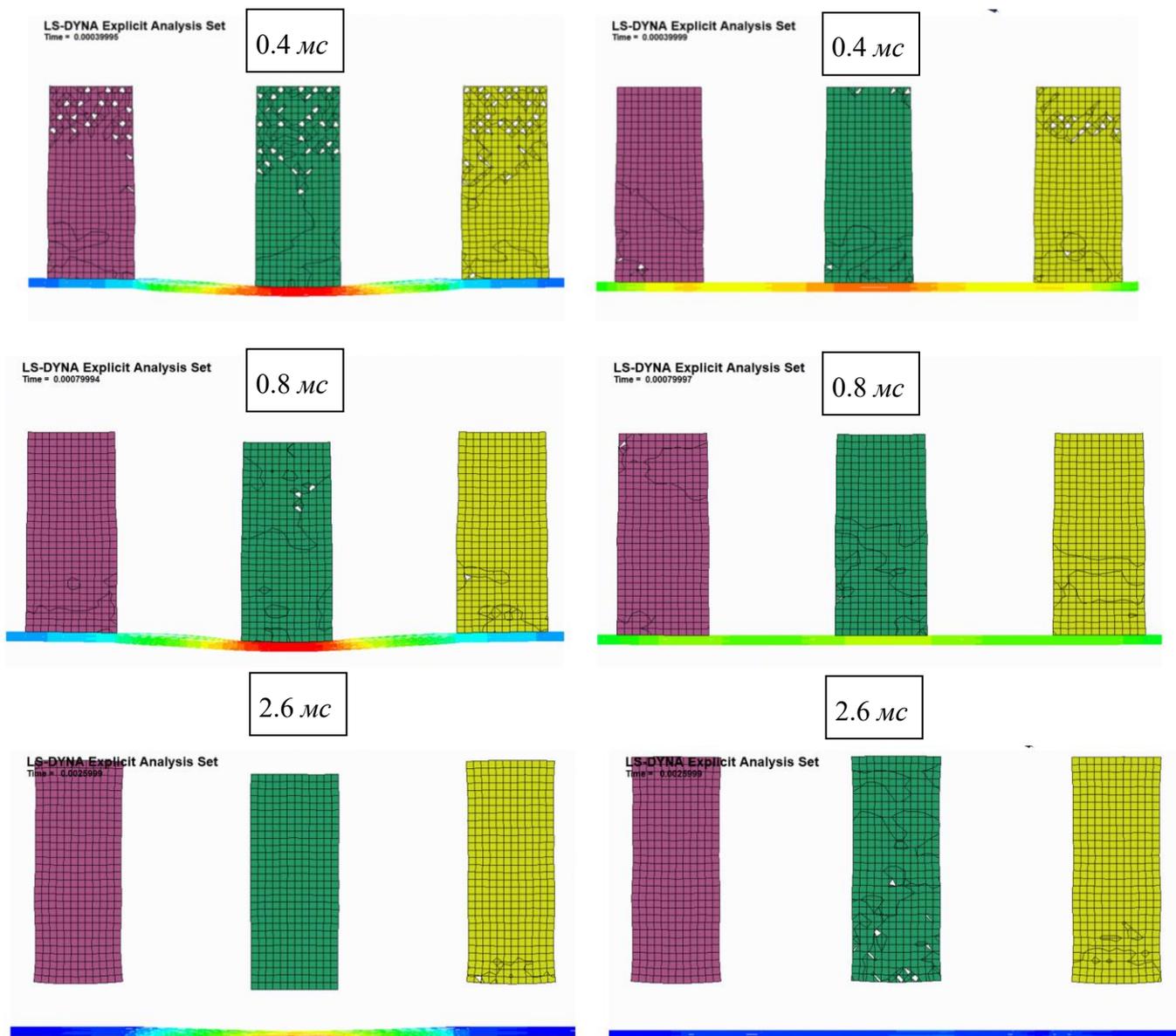


Рис. 19 – Состояние конструкции в центральном сечении в различные моменты времени

Из рисунков 18-19 следует, что при ударе фрагмента пневматика №1 в центр дефекта поведение конструкции существенно отличается для случаев наличия и отсутствия дефектов. В случае наличия дефектов максимальный прогиб обшивки в зоне удара фрагмента №1 больше в 4.76 раза, а максимальный индекс разрушения по критерию LaRC03 увеличивается в 1.79 раза.

## 6.2.4 Удар градом

Рассматривается ударное воздействие на квадратную пластину, имеющую множественные дефекты круговой формы заданного радиуса. Сторона пластины 500 мм. Схема укладки обшивки и стрингеров:  $[-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{\text{sym}}$ . Стрингеры имеют Т-образное сечение с размерами 62.5x32.9 мм. Предполагается, что в обшивке панели между всеми слоями присутствуют межслоевые дефекты типа расслоений круговой формы (диаметр дефектов 100 мм). Град имеет форму шара радиуса  $R = 20$  мм и моделируется с помощью метода SPH (Smooth Particle Hydrodynamics). В качестве модели материала града используется «155\_PLASTICITY\_COMPRESSION\_TENSION\_EOS». Скорость града направлена перпендикулярно внешней поверхности обшивки и составляет 10 м/с.

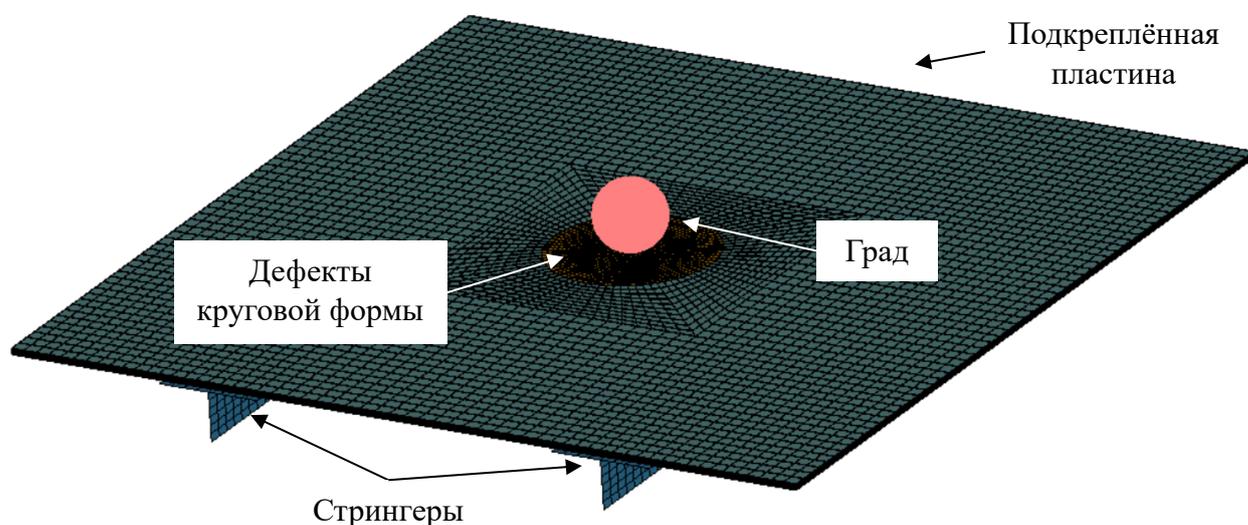


Рис. 20 – КЭМ панели с дефектами произвольной формы

На рисунке 21 представлено изменение прогибов панели в точке соударения, а на рисунке 22 состояние модели в различные моменты времени.

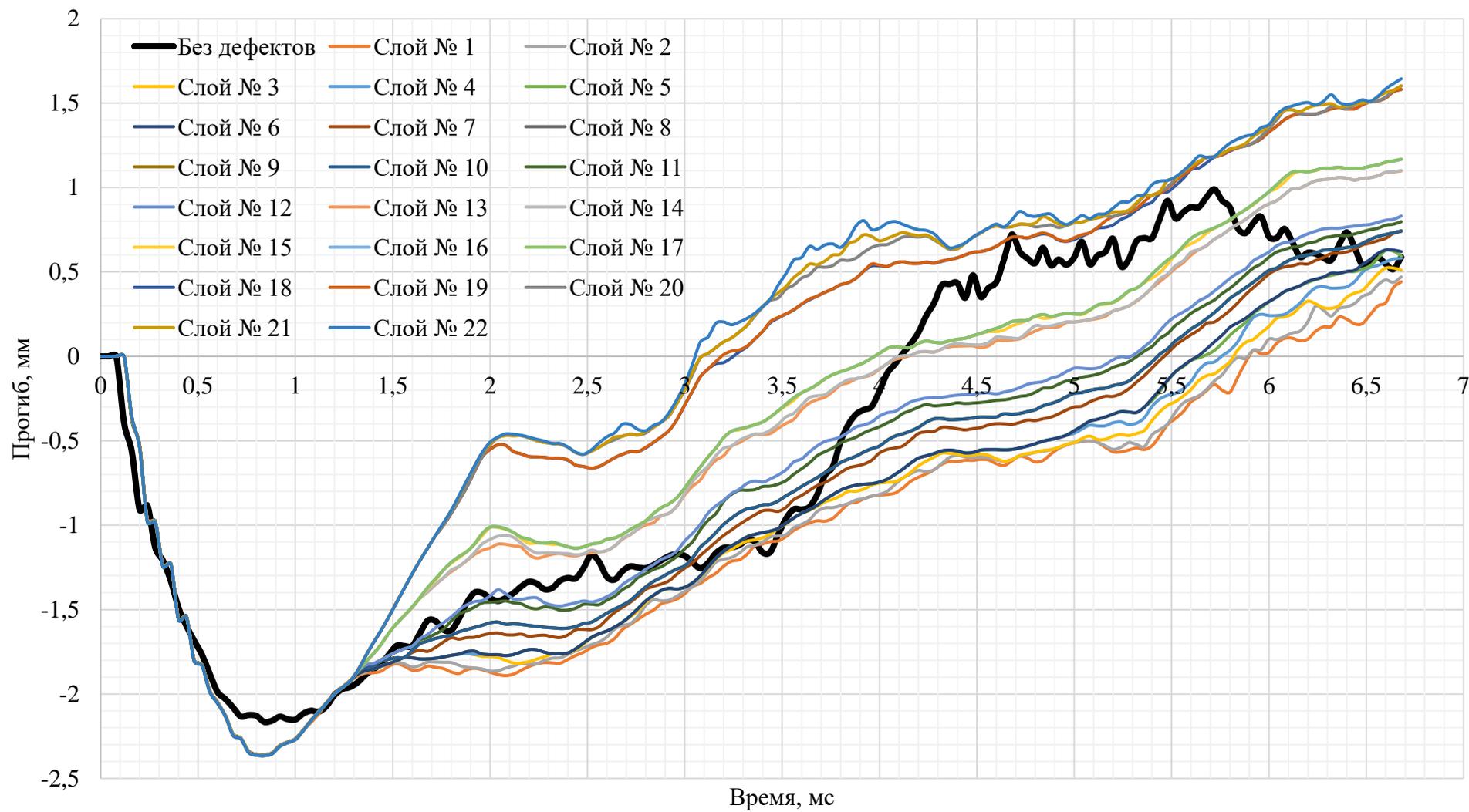


Рис. 21 - Изменение прогибов в пластине при ударном воздействии града (в точке соударения)

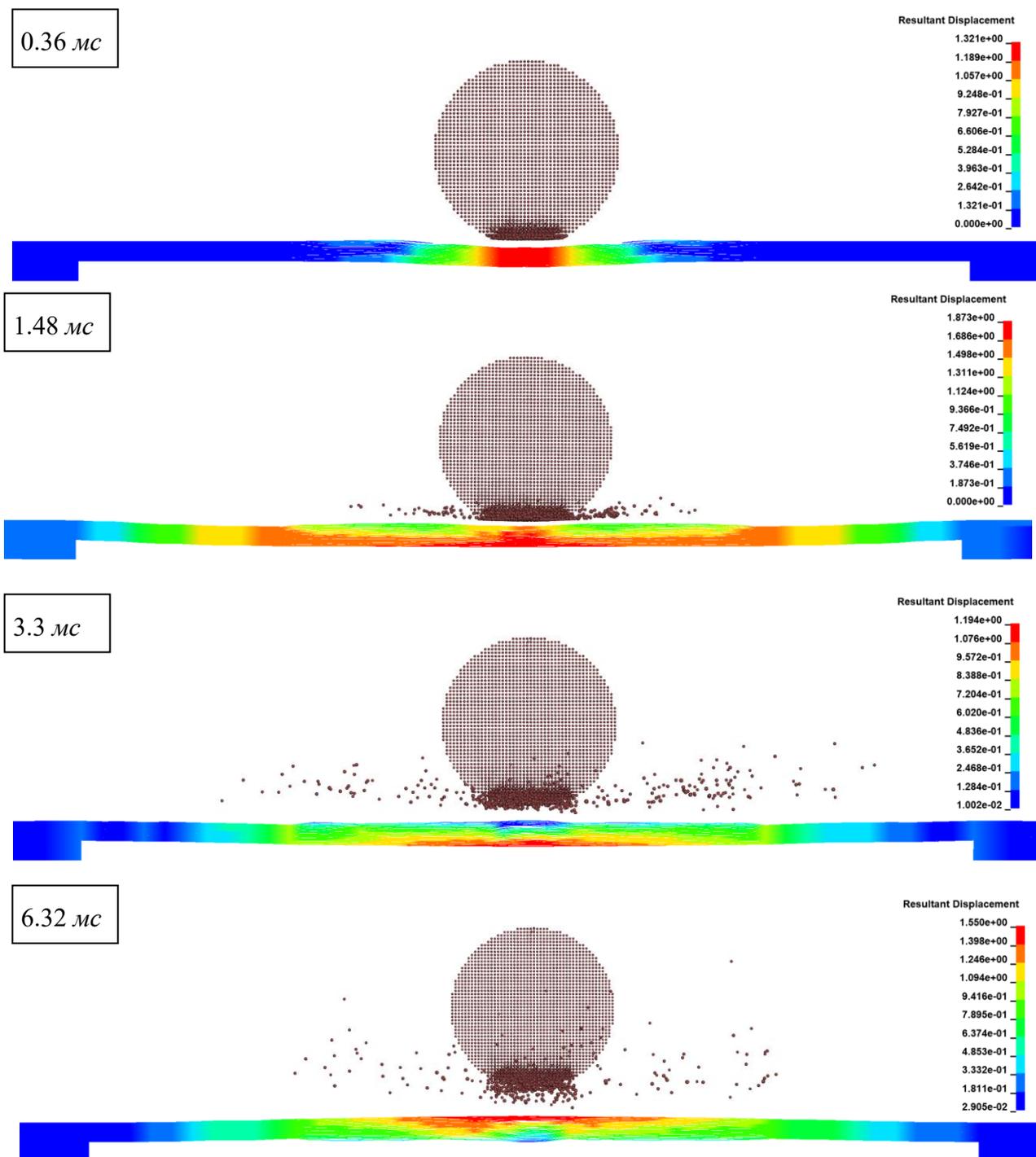


Рис. 22 – Состояние модели в различные моменты времени

В таблице 4 представлены сводные данные по уменьшению коэффициентов запасов прочности и увеличению площади расслоений для рассматриваемых элементов конструкции в случае наличия дефектов (в таблице также представлены данные из работ авторов [17]-[20]).

Таблица 4 - Сводная таблица результатов

Элемент конструкции	Вид нагрузки	$\eta, f, S$
Подкреплённая панель	Взрывная нагрузка	$\eta = 1.86$
	Удар жёстким импактором	$S = 1.27$
Гладкая цилиндрическая оболочка	Взрывная нагрузка	$\eta = 1.33$
Подкреплённая цилиндрическая оболочка	Удар жёстким импактором	$S = 3.76$
	Взрывная нагрузка	$f = 3.7$
	Удар фрагментами пневматика	$f = 1.79$
$\eta$ – уменьшение минимального коэффициента запаса прочности; $f$ – увеличение максимального индекса разрушения; $S$ – увеличение площади расслоения.		

### Заключение

Разработанная методика позволяет учитывать дефекты типа расслоений в элементах конструкций из ПКМ и проводить оценку их влияния при действии динамических воздействий различного характера.

В рамках работы разработана программа для автоматизированного создания КЭМ оболочек, панелей, пластин с подкреплениями и без них при наличии дефектов различной формы, размера и расположения.

Для рассматриваемых элементов конструкций при наличии в них дефектов, минимальный коэффициент запаса прочности снижается в 3.7 раза; площадь расслоения увеличивается 3.76.

### Список источников

1. Голован В.И., Дударьков Ю.И., Левченко Е.А., Лимонин М.В. Несущая способность панелей из композиционных материалов при наличии эксплуатационных повреждений // Труды МАИ. 2021. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112830>. DOI: [10.34759/trd-2020110-5](https://doi.org/10.34759/trd-2020110-5)

2. Фирсанов Вал.В., Фам В.Т., Чан Н.Д. Анализ напряженно-деформированного состояния многослойных композитных сферических оболочек на основе уточненной теории // Труды МАИ. 2021. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118893>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-07](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-07)
3. Локтева Н.А., Сердюк Д.О., Скопинцев П.Д., Федотенков Г.В. Нестационарное деформирование анизотропной круговой цилиндрической оболочки // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161423>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-09](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-09)
4. Голдовский А.А., Фирсанов В.В. Алгоритмы исследования ударного взаимодействия элементов авиационных конструкций // Труды МАИ. 2021. № 111. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=115122>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-6](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-6)
5. Семенов А.А., Карпов В.В. Математическая модель деформирования подкреплённых ортотропных оболочек вращения // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 13. С. 100-106.
6. Горшков А.Г., Тарлаковский Д.В. Динамические контактные задачи с подвижными границами. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 352 с.
7. Абросимов Н.А., Баженов В.Г. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. – 400 с.
7. Ls-dyna keyword user's manual volume ii material models. R:14079. URL: <https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r-7.0-vol-ii>
9. Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites // Journal of Applied Mechanics, 1980, vol. 47, pp. 329-334. DOI: [10.1115/1.3153664](https://doi.org/10.1115/1.3153664)

10. Chjkang F.K., Chang K.Y. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentration // Journal of Composite Materials, 1987, vol. 21, pp. 834-855.
11. Puck A., Schurmann H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models // Composites Science and Technology, 2002, vol. 58, pp. 1045-1067. DOI:[10.1016/S0266-3538\(01\)00208-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00208-1)
12. Sebaey T.A., Blanco N., Lopes C.S., Costa J. Numerical investigation to prevent crack jumping in Double Cantilever Beam test of multidirectional composite laminates // Composites Science and Technology, 2011, vol. 71, pp. 1587-1592. DOI:[10.1016/j.compscitech.2011.07.002](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.07.002)
13. Schwer L., Teng H., Souli M. LS-DYNA Air Blast Techniques: Comparisons with Experiments for Close-in Charges // 10th European LS-DYNA Conference, 2015, Würzburg, Germany.
14. Tabatabaei Z.S., Volz J.S. A Comparison between Three Different Blast Methods in LS-DYNA: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE // 12th International LS-DYNA Users Conference, 2012, Detroit.
15. Johnson A.F. Modelling impact damage in composite structural elements, Chapter 14, Multiscale Modelling of Composite Materials and Systems, (eds) P. Beaumont and C. Soutis, Woodhead, Cambridge, 2005.
16. Boyce M.C., Arruda E.M. Constitutive models of rubber elasticity: A review // Rubber Chemistry and Technology, 2000, no. 73, pp. 504-523. DOI:[10.5254/1.3547602](https://doi.org/10.5254/1.3547602)

17. 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*, 2020, vol. 17, no. 35, pp. 1218-1230.
18. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Dedova D.V. Behavior of a cylindrical reinforced carbon fiber shell under impact load // *TEM Journal*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 1597-1604.
19. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Поведение полой композитной четырёхстрингерной панели с внутренними повреждениями при нестационарном воздействии // *Учёные записки ЦАГИ*. 2020. Т. 51. № 2. С. 47-56.
20. Мартиросов М.И., Медведский А.Л., Хомченко А.В. Поведение слоистых элементов конструкций из полимерного композита с внутренними дефектами при нестационарных воздействиях // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2020. Т. 26. № 2. С. 259-268. DOI: [10.33113/mkmk.ras.2020.26.02.259\\_268.08](https://doi.org/10.33113/mkmk.ras.2020.26.02.259_268.08)

## References

1. Golovan V.I., Dudar'kov Yu.I., Levchenko E.A., Limonin M.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 110. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112830>. DOI: [10.34759/trd-2020110-5](https://doi.org/10.34759/trd-2020110-5)
2. Firsanov Val.V., Fam V.T., Chan N.D. *Trudy MAI*, 2021, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118893>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-07](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-07)

3. Lokteva N.A., Serdyuk D.O., Skopintsev P.D., Fedotenkov G.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL:<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161423>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-09](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-09)
4. Goldovskii A.A., Firsanov V.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 111. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115122>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-6](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-6)
5. Semenov A.A., Karpov V.V. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*, 2013, no. 13, pp. 100-106.
6. Gorshkov A.G., Tarlakovskii D.V. *Dinamicheskie kontaktnye zadachi s podvizhnymi granitsami* (), Moscow, Nauka. Fizmatlit, 1995, 352 p.
7. Abrosimov N.A., Bazhenov V.G. *Nelineinye zadachi dinamiki kompozitnykh konstruktsii* (), Nizhnii Novgorod, Izd-vo NNGU, 2002, 400 p.
8. *Ls-dyna keyword user's manual volume ii material models. R:14079*. URL: <https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r-7.0-vol-ii>
9. Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, *Journal of Applied Mechanics*, 1980, vol. 47, pp. 329-334. DOI: [10.1115/1.3153664](https://doi.org/10.1115/1.3153664)
10. Chjkang F.K., Chang K.Y. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentration, *Journal of Composite Materials*, 1987, vol. 21, pp. 834-855.
11. Puck A., Schurmann H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models, *Composites Science and Technology*, 2002, vol. 58, pp. 1045-1067. DOI:[10.1016/S0266-3538\(01\)00208-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00208-1)

12. Sebaey T.A., Blanco N., Lopes C.S., Costa J. Numerical investigation to prevent crack jumping in Double Cantilever Beam test of multidirectional composite laminates, *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, pp. 1587-1592. DOI:[10.1016/j.compscitech.2011.07.002](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.07.002)
13. Schwer L., Teng H., Souli M. LS-DYNA Air Blast Techniques: Comparisons with Experiments for Close-in Charges, *10th European LS-DYNA Conference*, 2015, Würzburg, Germany.
14. Tabatabaei Z.S., Volz J.S. A Comparison between Three Different Blast Methods in LS-DYNA: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE, *12th International LS-DYNA Users Conference*, 2012, Detroit.
15. Johnson A.F. *Modelling impact damage in composite structural elements*, Chapter 14, *Multiscale Modelling of Composite Materials and Systems*, (eds) P. Beaumont and C. Soutis, Woodhead, Cambridge, 2005.
16. Boyce M.C., Arruda E.M. Constitutive models of rubber elasticity: A review, *Rubber Chemistry and Technology*, 2000, no. 73, pp. 504-523. DOI:[10.5254/1.3547602](https://doi.org/10.5254/1.3547602)
17. 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*, 2020, vol. 17, no. 35, pp. 1218-1230.
18. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Dedova D.V. Behavior of a cylindrical reinforced carbon fiber shell under impact load, *TEM Journal*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 1597-1604.

19. Medvedskii A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2020, vol. 51, no. 2, pp. 47-56.
20. Martirosov M.I., Medvedskii A.L., Khomchenko A.V. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 259-268. DOI: [10.33113/mkmk.ras.2020.26.02.259\\_268.08](https://doi.org/10.33113/mkmk.ras.2020.26.02.259_268.08)

Статья поступила в редакцию 17.04.2022

Статья после доработки 18.04.2022

Одобрена после рецензирования 25.04.2022

Принята к публикации 21.06.2022

The article was submitted on 17.04.2022; approved after reviewing on 25.04.2022; accepted for publication on 21.06.2022