

УДК 539.3

DOI 10.33113/mkmk.ras.2020.26.02.259\_268.08

## ПОВЕДЕНИЕ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА С ВНУТРЕННИМИ ДЕФЕКТАМИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Медведский А.Л.<sup>1</sup>, Мартиросов М.И.<sup>2</sup>, Хомченко А.В.<sup>3</sup><sup>1</sup>ГНЦ ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт  
им. проф. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Россия<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)», г. Москва, Россия<sup>3</sup>ПАО «Корпорация «Иркут», г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

Повышенные требования к новым образцам техники в различных областях машиностроения приводят к необходимости использования современных конструкционных материалов, которые по своим характеристикам должны превосходить традиционные материалы. Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) при создании элементов конструкций получило широкое распространение. При всех преимуществах, изделия из ПКМ чувствительны к внутренним дефектам, которые могут появляться на различных этапах производства и эксплуатации. В работе изложены общие принципы моделирования слоистых конструкций с учётом внутренних дефектов между слоями с использованием программных комплексов (LS-DYNA, Siemens Femap) на основе метода конечных элементов (МКЭ) с применением явной схемы интегрирования полной системы уравнений МКЭ. Приведены результаты расчётов для слоистых тонкостенных конструкций, выполненных из высокомодульного полимерного композита и находящихся под действием нестационарных нагрузок, а именно: прямоугольная пластина и гладкая пологая цилиндрическая панель под действием поля давления, подкреплённая пологая цилиндрическая панель и гладкая цилиндрическая оболочка под действием взрывной сферической волны. Проводится анализ поведения вышеуказанных слоистых конструкций с дефектами эллиптической формы и без них. Определяются поля напряжений, деформаций и перемещений в монослоях в различные моменты времени. Вычисляются коэффициенты запаса прочности по критериям: Hashin, Chang-Chang, Puck, LaRC03, Fischer. Оценивается степень влияния межслоевых дефектов. Разработанная методика позволяет учитывать влияние на прочность межслоевых дефектов произвольной формы, размера и расположения между слоями композитного пакета (КП).

**Ключевые слова:** нестационарные воздействия; полимерный композиционный материал; метод конечных элементов; критерии разрушения композитов

## BEHAVIOR OF LAYERED STRUCTURAL ELEMENTS MADE OF POLYMER COMPOSITE WITH INTERNAL DEFECTS UNDER NONSTATIONARY INFLUENCES

Medvedsky A.L.<sup>1</sup>, Martirosov M.I.<sup>2</sup>, Khomchenko A.V.<sup>3</sup><sup>1</sup>Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia<sup>3</sup>Irkut Corporation, Moscow, Russia

## ABSTRACT

Increased requirements for new models of equipment in various fields of mechanical engineering lead to the need to use modern structural materials, which by their characteristics should exceed traditional materials. The use of polymer composite materials (PCM) in the creation of structural elements has become widespread. With all the advantages, PCM products are sensitive to internal defects that can appear at various stages of production and operation. The paper describes General principles of modeling layered structures with consideration for internal defects between layers using software systems (LS-DYNA, Siemens Femap) based on the finite element method (FEM) using an explicit scheme for integrating a complete system of FEM equations. The results of calculations for layered thin-walled structures made of a high-modulus polymer composite and subjected to non-stationary loads are presented, namely: a rectangular plate and a smooth flat cylindrical panel under the influence of a pressure field, a reinforced flat cylindrical panel and a smooth cylindrical shell under the action of an explosive spherical wave. The behavior of the above-mentioned layered structures with and without elliptical defects is analyzed. The fields of stress, strain, and displacement in the mono-layers at various times are determined. Safety factors coefficients are calculated using the following criteria: Hashin, Chang-Chang, Puck, LaRC03, Fischer. The degree of influence of interlayer defects is estimated. The developed method allows us to consider the influence on the strength of interlayer defects of any shape, size and location between the layers of the composite package (CP).

**Keywords:** nonstationary influence; polymer composite material; finite element method; composite failure criteria

## ВВЕДЕНИЕ

Среди внутренних дефектов, возникающих в ПКМ, часто встречаются дефекты типа расслоений. Расслоение – нарушение адгезионной связи между слоями наполнителя в ПКМ, вызванное механическими воздействиями ударного характера или внутренними напряжениями в изделии после формования или проведения сборочно-монтажных работ. Наличие дефекта связано с растрескиванием матрицы и разрушением волокон, что влечёт за собой снижение прочности элемента конструкции. Во многих случаях дефекты могут быть надёжно обнаружены только с использованием дорогостоящих средств неразрушающего контроля (ультразвуковая дефектоскопия, рентгеновская, токовихревая, оптическая голография, акустический контроль и т.д.). Спектр действующих нестационарных нагрузок на элементы конструкции из ПКМ очень широк: акустические и аэродинамические поля давлений, удары внешними источниками, взрывные волны и т.п. При анализе поведения элементов конструкции из однонаправленного ПКМ (углелента) рассматриваются критерии разрушения, позволяющие оценивать разрушение матрицы и волокна отдельно (Hashin [1], Chang-Chang [2], Puck [3], LaRC03 [4]). Для элемента конструкции из двунаправленного композита (углеткань) приведены результаты, полученные по критерию Fischer [5]. Также стоит отметить, что критерии Puck и LaRC03 являются наиболее современными критериями, которые учитывают особенности разрушения однонаправленных композитов.

Ранее авторами было рассмотрено поведение слоистых конструкций (пластина [6], гладкая панель [7], подкреплённая панель [8]) при наличии произвольно расположенных межслоевых дефектов типа расслоений при действии нестационарных нагрузок различного характера.

## 1. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

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

а) моделирование каждого монослоя КП отдельным набором конечных элементов;

б) соединение слоёв элементов с помощью клеявого контакта, за исключением зон, где располагаются дефекты, в этих зонах учитывается односторонний контакт;

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

г) проведение расчёта 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.

## 2. ПРЯМОУГОЛЬНАЯ ПЛАСТИНА

Рассматривается 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  $h = 0.285$  мм. Между слоями №1-2, №2-3 и т.д. до №6-7 расположены дефекты (расслоения) в форме эллипса с осями 46 и 26 мм (рис.1). Здесь и далее рассматриваются дефекты, расположенные один под другим. В качестве граничных условий рассматривается шарнирное опирание вдоль длинных кромок.

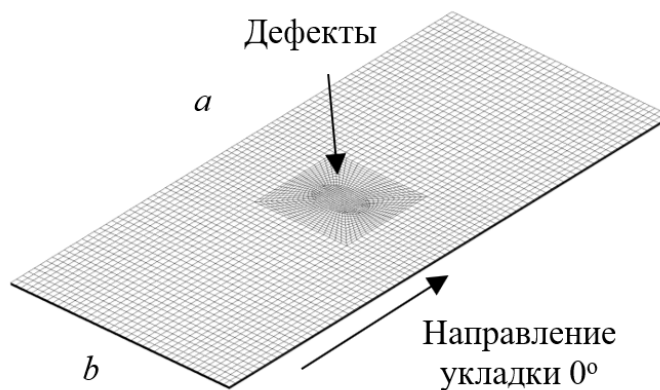
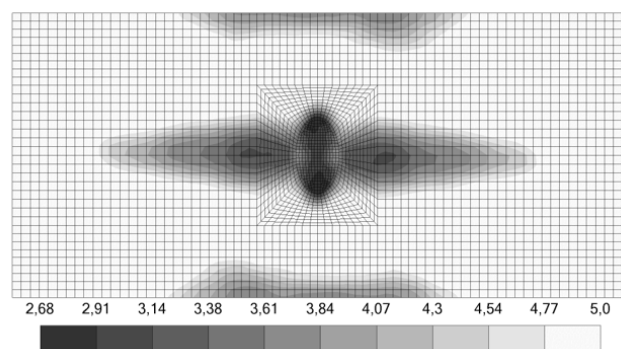
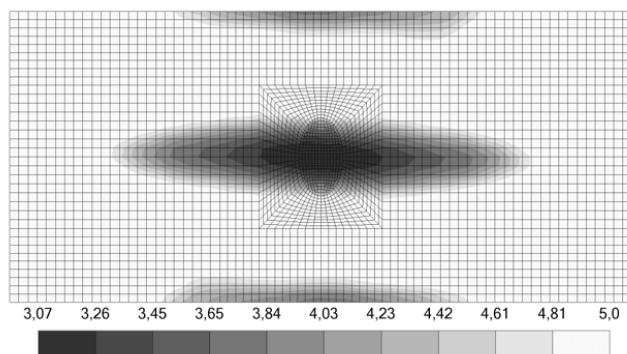


Рис.1. Прямоугольная пластина.

На панель действует поле давления, которое изменяется по закону:  $p(t) = p_0 H(t)$ , где  $p_0 = 1.5$  МПа,  $H(t)$  – функция Хэвисайда. На рис.2 показано распределение коэффициентов запаса по критерию Fischer в слое №3 ( $0^\circ$ ) в момент времени 0.82 мс.



а



б

Рис.2. Распределение коэффициентов запаса по критерию Fischer (а – с дефектами, б – без дефектов).

Из рис.2 видно, что коэффициент запаса по критерию Fischer снижается в 1.14 раза.

Далее представлены результаты для объектов, которые выполнены из высокомодульного углепластика на основе ленты и эпоксидного связующего HexPly M21/34%/UD194/ИМА. Толщина монослоя  $h = 0.184 \dots 0.19$  мм.

### 3. ГЛАДКАЯ ПАНЕЛЬ

Рассматривается прямоугольная в плане пологая гладкая панель (рис.3) с межслоевыми дефектами в форме эллипса (с осями 34 и 24 мм), которые расположены между всеми слоями (№1-2, №2-3 и т.д. до №11-12). Длина панели  $a = 340$  мм, ширина  $b = 140$  мм, стрела подъёма  $c = 4.9$  мм. Формат укладки панели:  $[+45^\circ / -45^\circ / 90^\circ / 0^\circ / +45^\circ / -45^\circ]_s$ . На панель действует поле давления, изменяющееся по закону:  $p(\varphi, t) = p_0 \cos^2 \varphi H(t) H\left(\frac{\pi}{2} - |\varphi|\right)$ , где  $p_0 = 1$  Мпа (изменение угловой координаты  $\varphi$  происходит вдоль короткой кромки панели). Панель шарнирно опёрта вдоль длинных кромок.

Критерии Hashin, Chang-Chang и Puck дают идентичное распределение для реализуемой формы разрушения (сжатие вдоль волокна), минимальное значение для указанных критериев составляет 1.34 в случае наличия дефектов. На рис.4 показано распределение коэффициента запаса по критерию LaRC03 в момент времени 0.44 мс в слое №3 ( $90^\circ$ ).

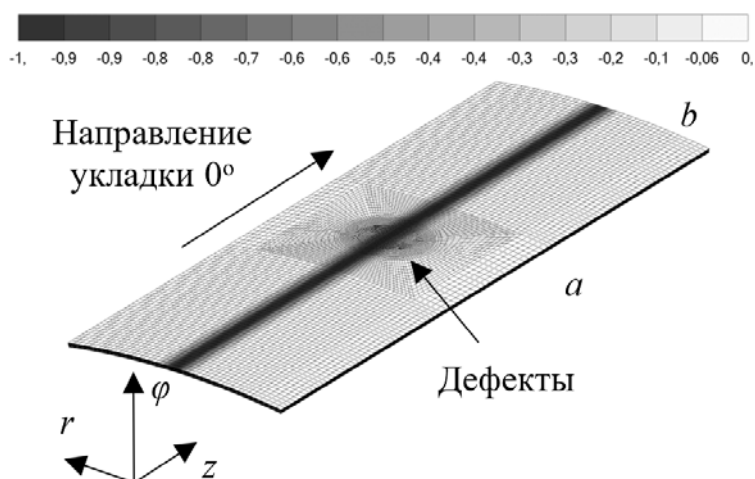


Рис.3. Распределение поля внешнего давления на поверхности гладкой панели, Мпа.

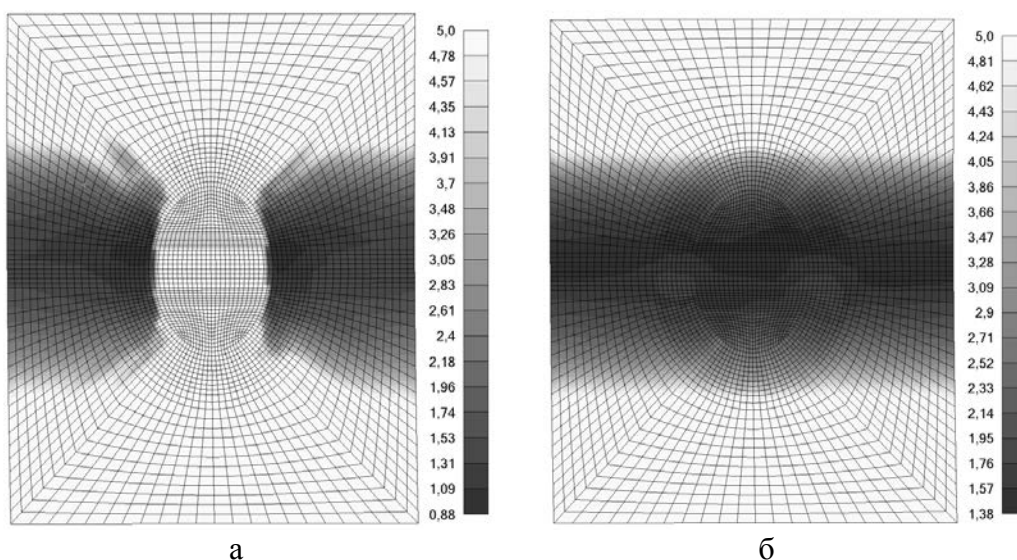


Рис.4. Коэффициент запаса по критерию LaRC03 (а – с дефектами; б – без дефектов).

Минимальное значение для критерия LaRC03 составляет 0.88, в случае отсутствия дефектов – 1.38. Снижение прочности в 1.57 раз.

#### 4. ПОДКРЕПЛЁННАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ПАНЕЛЬ

Рассматривается цилиндрическая подкреплённая пологая панель с межслоевыми дефектами под действием нестационарного поля давления (рис.5). Длина 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:  $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$ . Предполагается, что в межстрингерной зоне расположены эллиптические дефекты (с осями 36 и 26 мм) между всеми слоями обшивки. В качестве внешнего воздействия рассматривается взрывное воздействие с энергией взрыва  $E = 209.2$  кДж и волной сферической формы.

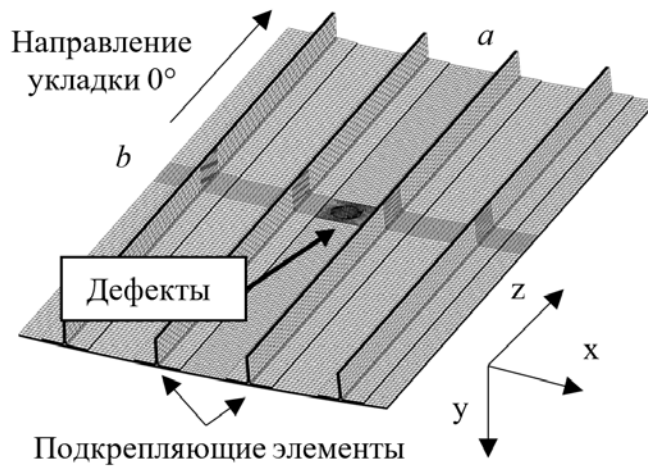


Рис.5. Конечно-элементная модель цилиндрической панели.

Эпицентр взрыва расположен на расстоянии 500 мм от внешней поверхности панели. Панель шарнирно опёрта вдоль длинных кромок. На рис.6 показаны прогибы панели вдоль дефектов в различные моменты времени.

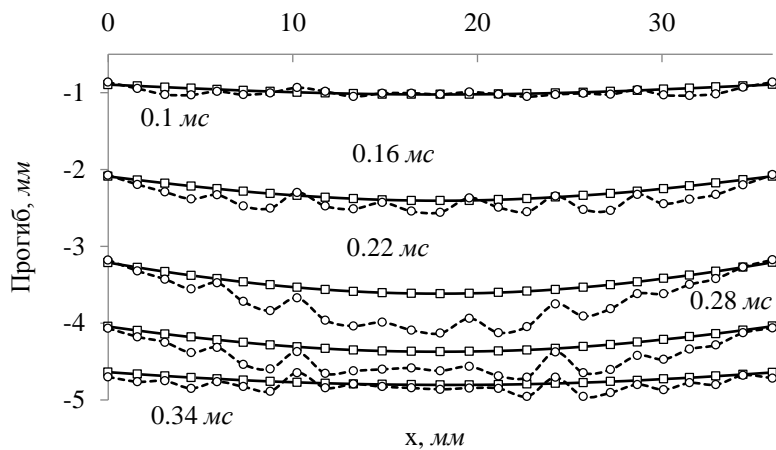


Рис.6. Прогиб панели в различные моменты времени.

На рис.7 показана картина нормальных продольных напряжений в момент времени 0.22 мс в слое №4 (90°).

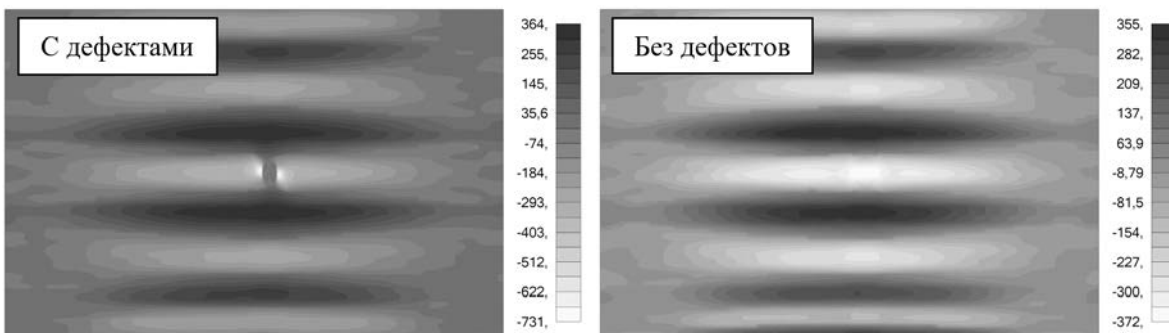


Рис.7. Нормальные продольные напряжения, слой №4 (90°) в момент времени 0.22 мс, Мпа.

На рис.8 показано распределение коэффициента запаса по критерию Puck (минимальный запас среди рассматриваемых критериев) в слое №4 ( $90^\circ$ ) в момент времени 0.22 мс в области расположения дефектов.

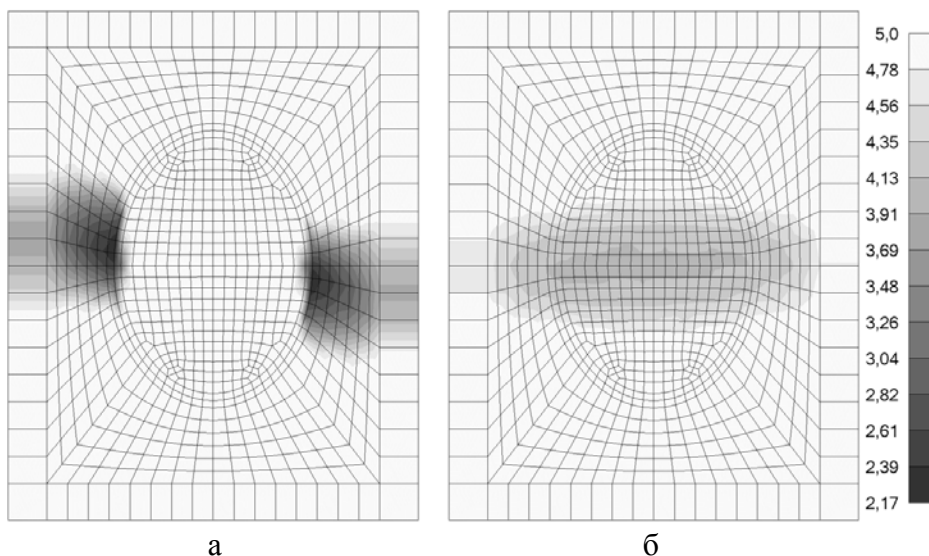


Рис.8. Распределение коэффициента запаса прочности в слое №4 ( $90^\circ$ ) в момент времени 0.22 мс. а – с дефектами, б – без дефектов.

Из рис.8 видно, что коэффициент запаса по критерию Puck снижается в 1.86 раза в случае наличия дефектов.

## 5. ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ОБОЛОЧКА

Рассматривается гладкая цилиндрическая оболочка длиной  $L = 800$  мм и радиусом  $R = 200$  мм (рис.9). Формат укладки оболочки:  $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$ .

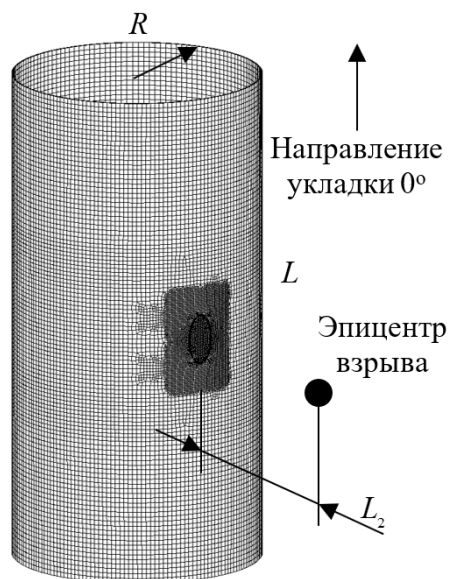


Рис.9. Конечно-элементная модель цилиндрической оболочки.

Предполагается, что между слоями №1-2, №2-3 и т.д. до №11-12 расположены дефекты эллиптической формы с осями 80 и 45 мм. На оболочку действует взрывная сферическая волна, эпицентр взрыва расположен на расстоянии  $L_2 = 900$  мм от внешней поверхности оболочки. Торцы оболочки шарнирно закреплены.

На рис.10 показано изменение давления на внешней поверхности оболочки в центре расположения дефектов для различных уровней энергии взрыва.

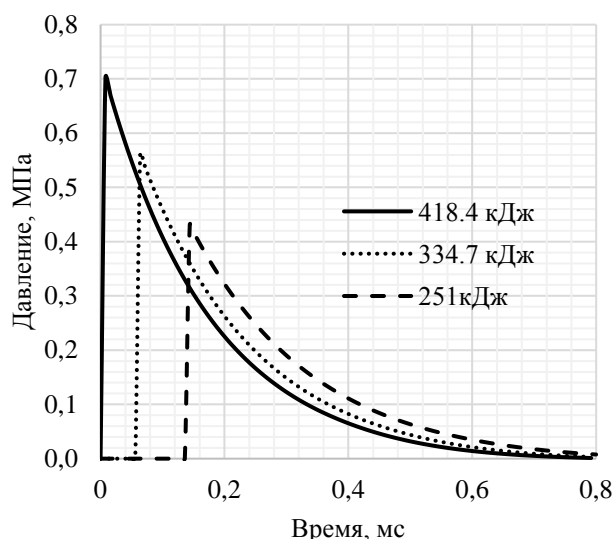


Рис.10. Изменение давления на внешней поверхности в центре расположения дефектов в различные моменты времени.

Наиболее консервативную оценку показал критерий LaRC03 (форма разрушения – сжатие волокна, сжатие матрицы). На рис.11 показано изменение минимального коэффициента запаса для слоя №10 ( $90^\circ$ ) в различные моменты времени при энергии взрыва 418.4 кДж.

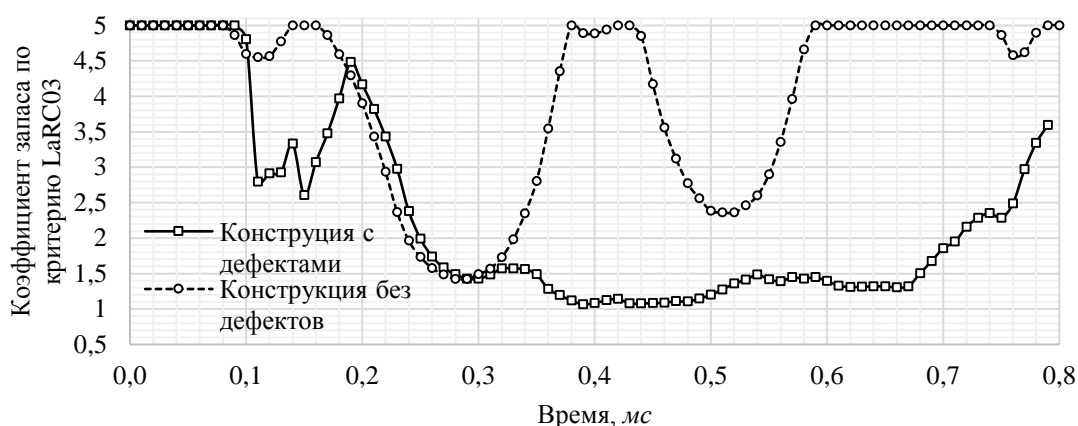


Рис.11. Изменение минимального коэффициента запаса по критерию LaRC03 в слое №10 ( $90^\circ$ ) при энергии взрыва 418.4 кДж.

Из рис. видно, что минимальный коэффициент запаса по критерию LaRC03 снижается в 1.33 раза для случая наличия дефектов между слоями.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В таблице представлены сводные данные по коэффициентам снижения прочности рассматриваемых элементов конструкции в случае наличия дефектов.

Таблица  
Сводная таблица коэффициентов снижения прочности

Элемент конструкции	Вид нагрузки	Коэффициент снижения прочности
Прямоугольная пластина	Поле давления	1.14
Гладкая панель		1.57
Подкреплённая панель	Взрывная нагрузка	1.86
Гладкая оболочка		1.33

Из таблицы видно, что для рассматриваемых элементов конструкций прочность при наличии дефектов может снижаться в 1.86 раза (подкреплённая панель). Предложенная методика позволяет исследовать поведение слоистых элементов конструкций из ПКМ при наличии межслоевых дефектов произвольной формы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hashin Z. *Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites* // Journal of Applied Mechanics. – 1980. – Vol.47. – Pp.329-334.
2. Chang 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.
3. Puck A., Schurmann H. *Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models* // Composites Science and Technology. – 1998. – Vol.58. – Pp.1045-1067.
4. 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.
5. Fischer L. *How to predict structural behavior of R.P. Laminates* // Modern Plastics. – 1960. – Vol.6. – Pp.65-68.
6. 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. – 2019. – Supplement 21. – No.1. – Pp.565-576.
7. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. *Поведение полой композитной панели с внутренними повреждениями под действием нестационарной нагрузки* // Строительная механика и расчет сооружений. – 2019. – №2. – С.43-47.
8. 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.

## REFERENCES

1. Hashin Z. *Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites*. Journal of Applied Mechanics, 1980, Vol.47, Pp.329-334.
2. Chang 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.
3. Puck A., Schurmann H. *Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models*. Composites Science and Technology, 1998, Vol.58, Pp.1045-1067.
4. 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.
5. Fischer L. *How to predict structural behavior of R.P. Laminates*. Modern Plastics, 1960, Vol.6, Pp.65-68.
6. 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, 2019, Supplement 21, No.1, Pp.565-576.
7. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V. *Behavior of a flat composite panel with internal damages under the influence of non-stationary load*. Structural Mechanics and Analysis of Constructions, 2019, No.2, Pp.43-47.
8. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V. *Behaviour of a flat composite four-stringer panel with internal damages under unsteady impact*. TsAGI Science Journal, 2020, Vol.51, No.2, Pp.47-56.

Поступила в редакцию 04 июня 2020 года.

---

### Сведения об авторах:

Медведский Александр Леонидович – д.ф.-м.н., первый заместитель генерального директора, ГНЦ ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Россия; e-mail: [mdv66@mail.ru](mailto:mdv66@mail.ru)

Мартirosов Михаил Иванович – к.т.н., доц., ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: [MikhaelMartirosov@yandex.ru](mailto:MikhaelMartirosov@yandex.ru)

Хомченко Антон Васильевич – инж.-конструктор 1 категории, ПАО «Корпорация «Иркут», г. Москва, Россия; e-mail: [KhomchenkoAnton@yandex.ru](mailto:KhomchenkoAnton@yandex.ru)