

УДК 539.3

DOI: 10.30987/article_5d2d9231dd5853.89951988

А.Л. Медведский, М.И. Мартиросов, А.В. Хомченко

ДИНАМИКА ПОДКРЕПЛЁННОЙ КОМПОЗИТНОЙ ПАНЕЛИ СО СМЕШАННОЙ УКЛАДКОЙ МОНОСЛОЁВ С ВНУТРЕННИМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Исследовано поведение и разрушение подкреплённой пологой композитной панели с внутренними повреждениями при воздействии нестационарных нагрузок различного характера. Получено распределение напряжений в слоях подкреплённой панели при различных положениях и размерах внутренних повреждений в разные моменты времени при воздействии нестационарных полей давле-

ний. Определено распределение индексов разрушения с использованием различных критериев разрушения для однонаправленных композиционных материалов.

Ключевые слова: подкреплённая композитная панель, метод конечных элементов, нестационарная нагрузка, внутренние повреждения, критерии разрушения композитов.

A.L. Medvedsky, M.I. Martirosov, A.V. Khomchenko

DYNAMICS OF REINFORCED COMPOSITE PANEL WITH MONO-LAYER COMBINED STACKING WITH INNER DAMAGES AT NON-STATIONARY IMPACTS

The paper reports the consideration of the behavior and destruction of a reinforced multi-layer flat cylindrical panel made of polymeric composite based on carbon fiber and epoxy binder under the influence of non-stationary loads.

There are defined areas of stresses, deflections and indices of destruction for different time periods. To solve the problem there was used a finite element method based on LS-DYNA software complex.

The influence of location and dimensions of inner damages under the action of non-stationary fields of pressure is investigated.

The following fracture criteria were used: Hashin, Puck, Chang-Chang, LaRC03.

Key words: reinforced composite panel, finite element method, non-stationary load, inner damages, criteria of composite destruction.

Введение

В различных областях машиностроения все большую значимость приобретают изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ), которые обладают высокой удельной прочностью, жёсткостью, сопротивляемостью усталости, а также исключительным сочетанием конструктивных свойств, являющихся уникальными для каждого изделия за счет различных форматов укладок и физико-механических свойств монослоёв [1].

При всех преимуществах у изделий из ПКМ имеется ряд недостатков, один из которых - низкая ударная стойкость. В результате эксплуатации и внешних воздействий, а также в процессе производства в композитных пакетах (КП) могут возникать повреждения (под повреждением будем понимать отклонение изделия от нормы, вызванное производством или эксплу-

атацией; повреждение - нарушение исправного состояния изделия при сохранении его работоспособности), сопровождающиеся растрескиванием матрицы, разрушением волокон и монослоёв, что оказывает влияние на прочность и несущую способность изделий из ПКМ. Во многих случаях повреждения могут быть обнаружены только с использованием дорогостоящих средств неразрушающего контроля (ультразвуковая, рентгеновская, токовихревая дефектоскопия, оптическая голография, акустический контроль).

Особое место в механике композитов занимают задачи о динамическом поведении последних при наличии повреждений и исследование разрушения пластин и панелей с использованием различных критериев.

Постановка задачи

В работе рассматривается полая цилиндрическая панель из ПКМ, подкреплённая продольными элементами (стрингерами). Длина $a = 340$ мм, ширина $b = 140$ мм, стрела подъёма $c = 4,9$ мм [2] (рис. 1). Стрингеры имеют тавровое сечение с высотой стенки 12 мм и шириной основания 24 мм, толщина - 2,28 мм.

Цилиндрическая панель является многослойной конструкцией, которая состоит из 12 монослоёв толщиной $h = 0,19$

мм. Укладка монослоёв имеет следующий формат: $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$. Каждый слой изготовлен из однородного упругого ортотропного материала на основе препрега HexPly M21/34%/UD194/IMA-12K (углеродная лента IMA на основе высокопрочного волокна HexTow IMA-12K и эпоксидное модифицированное связующее M21) производства фирмы Hexcel Composites (США).

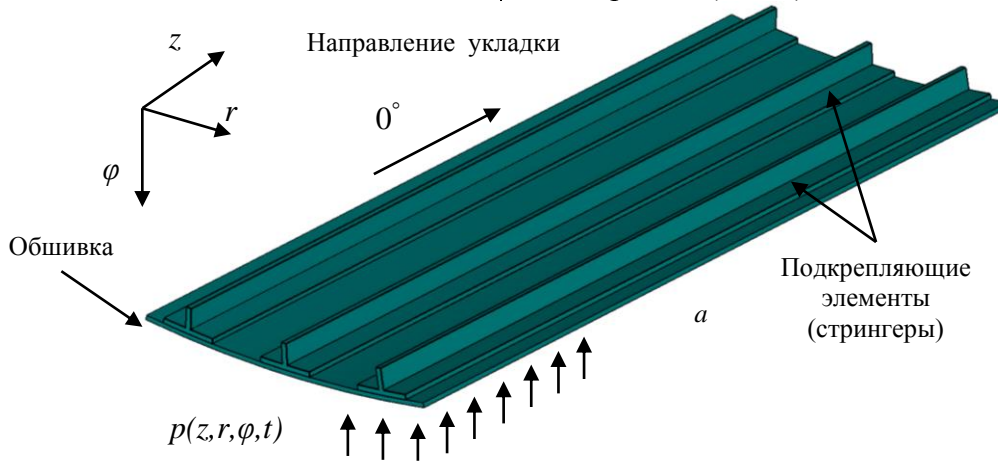


Рис. 1. Цилиндрическая подкреплённая панель из ПКМ

Рассматриваются два вида расположения повреждений:

1. Повреждения находятся в подстрингерной зоне, имеют эллиптическую форму с осями 34 и 24 мм и расположены по толщине панели согласно схеме на рис. 2в.

2. Повреждения находятся в межстрингерной зоне, имеют эллиптическую форму с осями 19,91 и 12 мм и расположены между всеми слоями (между № 1-2...№ 11-12).

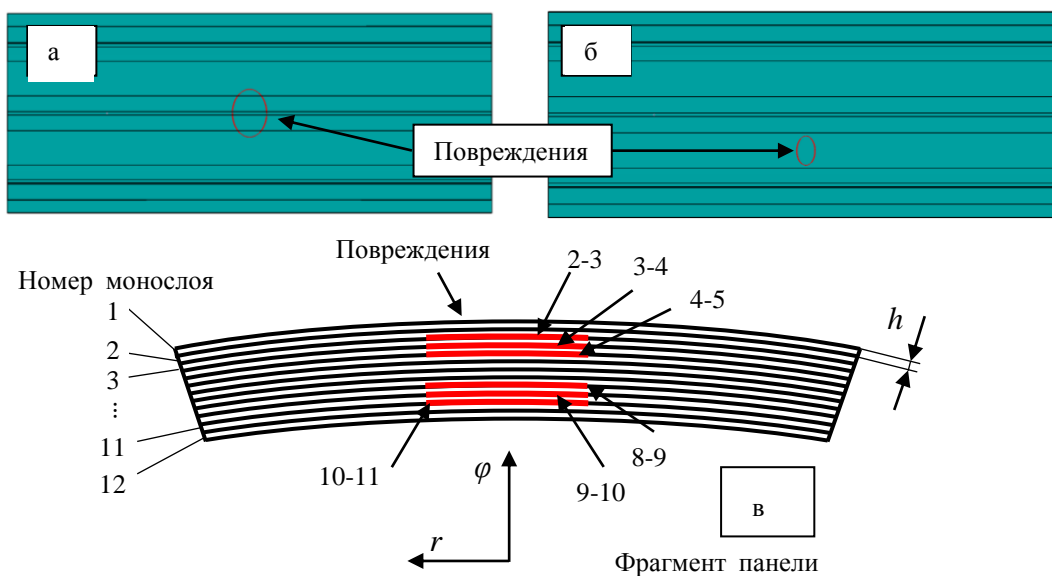


Рис. 2. Расположение повреждений: а - повреждения находятся в центральном сечении в подстрингерной зоне; б - повреждения находятся в межстрингерной зоне; в - расположение повреждений в центральном сечении по толщине панели при $z = 170$ мм

Воздействие нестационарной нагрузки на панель

В качестве внешней нагрузки, действующей на панель, рассматривались:

1. Поле, равномерно распределённое по поверхности панели, приложенное скачкообразно на панель с повреждениями в межстрингерной зоне:

$$p(t) = p_0 H(t),$$

где $H(t)$ - функция Хэвисайда; $p_0 = 1,5$ МПа.

2. Поле, приложенное скачкообразно на внешнюю поверхность панели с повреждениями в подстрингерной зоне [3], распределённое по поверхности панели по закону

$$p(\varphi, t) = -p_0 \cos^2 \varphi H(t) H\left(\frac{\pi}{2} - |\varphi|\right),$$

где φ - угловая координата; $p_0 = 1,0$ МПа.

Методика исследования

В результате проведенных расчётов определяется наиболее нагруженный слой в соответствующий момент времени, далее определяется распределение индекса разрушения f (разрушение слоя наступает при достижении $f = 1$) по различным критериям разрушения. В данной работе используются следующие критерии разрушения:

Задача решалась с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе LS-DYNA с применением явной схемы интегрирования полной системы уравнений МКЭ. Слои между собой соединены клеевым контактом, который гарантирует равенство перемещений и углов поворота. В зонах повреждений учитывается односторонний контакт. Формулировка используемых оболочечных элементов: «16 - Fully integrated shell element», свойства элементов - «COMPOSITE». Граничные условия для случая расположения повреждений в подстрингерной зоне соответствуют жёсткому защемлению длинных кромок панели, а в случае повреждений в межстрингерной зоне - шарнирному опиранию вдоль длинных кромок.

Hashin [4], Puck [5-7], Chang-Chang [8], LaRC03 [9; 10].

Вышеуказанные критерии позволяют оценивать прочность волокна и матрицы отдельно. Ниже приводятся необходимые зависимости для определения индексов разрушения для критерия LaRC03. В таблице указаны параметры, необходимые для критерия разрушения LaRC03.

Таблица

Типовые значения параметров для критерия LaRC03

Параметр	Типовое значение
Модуль упругости в продольном направлении E_1 , ГПа	128
Модуль упругости в поперечном направлении E_2 , ГПа	7,63
Модуль упругости в плоскости листа G_{12} , ГПа	3,2
Угол разрушения α_0 , град	53
Вязкость разрушения (форма I) G_{IC} , Н/мм	0,28
Вязкость разрушения (форма II) G_{IIC} , Н/мм	0,79
Коэффициент жёсткости разрушения g (G_{IC}/G_{IIC})	0,35
Предел толщины тонкого слоя, мм	0,7

Функции индексов разрушения включают в себя коэффициенты трения, параметры, характеризующие локальную прочность и несоосность волокон в слое.

Слоистые композиты часто имеют высокое сопротивление разрушению в

плоскости максимального напряжения сдвига. Это объясняется внутренним трением и учитывается в критерии прочности LaRC03 двумя коэффициентами трения:

- коэффициент поперечного трения

$$\eta^T = -\frac{1}{\tan(2\alpha_0)};$$

- коэффициент продольного трения

$$\eta^L = -\frac{S^L \cos(2\alpha_0)}{Y_C \cos^2(2\alpha_0)}.$$

Пределы локальной прочности в поперечном направлении и при сдвиге в

плоскости для тонкого слоя определяются следующим образом:

$$Y_{is}^T = \sqrt{\frac{8G_{IC}}{\pi t \Lambda_{22}}}; \quad S_{is}^L = \sqrt{\frac{8G_{IIC}}{\pi t \Lambda_{44}}},$$

где t - толщина встроенного слоя;

$$\Lambda_{22} = 2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{\nu_{21}^2}{E_1} \right); \quad \Lambda_{44} = \frac{1}{G_{12}}.$$

Для толстого слоя пределы локальной прочности не зависят от толщины слоя и определяются следующим образом:

$$Y_{is}^T = 1,12\sqrt{2}Y_L; \quad S_{is}^L = \sqrt{2}S_L.$$

Критерий LaRC03 учитывает несоосность волокон при сжатии и формулируется отдельно для поперечного растяжения и поперечного сжатия. В модели разрушения

несоосность волокон ограничена областями несоосности, в которых искажённые напряжения могут быть рассчитаны по неискажённым напряжениям.

Для критерия LaRC03 напряжения в областях несоосности вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_1^m &= \sigma_1 \cos^2(\varphi) + \sigma_2 \sin^2(\varphi) + 2\tau_{12} \sin(\varphi) \cos(\varphi); \\ \sigma_2^m &= \sigma_1 \sin^2(\varphi) + \sigma_2 \cos^2(\varphi) - 2\tau_{12} \sin(\varphi) \cos(\varphi); \\ \tau_{12}^m &= -\sigma_1 \sin(\varphi) \cos(\varphi) + \sigma_2 \sin(\varphi) + \tau_{12} (\cos^2(\varphi) - \sin^2(\varphi)), \end{aligned}$$

где φ - угол несоосности; σ_1 - нормальное напряжение, действующее в продольном направлении; σ_2 - нормальное напряжение, действующее в поперечном направлении; τ_{12} - сдвиговое напряжение, действующее в плоскости листа.

Угол несоосности для чистого сжатия φ^c может быть получен с использованием значений $\sigma_1 = X_C$ и $\sigma_2 = \tau_{12} = 0$ в приведенных выше уравнениях, а также напряжений σ_1^m и τ_{12}^m в квадратичном критерии разрушения матрицы при сжатии:

$$\varphi^c = \tan^{-1} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - 4 \left(\frac{S_{is}^L}{X_C} + \eta^L \right) \left(\frac{S_{is}^L}{X_C} \right)}}{2 \left(\frac{S_{is}^L}{X_C} + \eta^L \right)} \right).$$

где X_C - предел прочности в продольном направлении при сжатии.

Общий угол несоосности вычисляется с помощью зависимости

$$f_f = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1^T};$$

где f_f - индекс разрушения волокна.

$$f_f = \frac{|\tau_{12}^m| + \eta_L \sigma_2^m}{S_{is}^L}$$

Для оценки прочности волокон при их сжатии и растяжении матрицы применяется зависимость

$$f_f = g \left(\frac{\sigma_{22}^m}{Y_{is}^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}^m}{S_{is}^L} \right)^2 + (1 - g) \left(\frac{\sigma_{22}^m}{Y_{is}^T} \right) \quad \text{при } \sigma_1 \text{ и } \sigma_2^m \geq 0.$$

$$\varphi = \frac{|\tau_{12}| + (G_{12} - X_C)\varphi^c}{G_{12} + \sigma_1 - \sigma_2}.$$

Для оценки прочности волокна при растяжении применяется критерий максимальных деформаций:

при $\sigma_1 > 0$,

Для оценки прочности волокон при их сжатии и сжатии матрицы применяется зависимость

$$\text{при } \sigma_1 < 0 \text{ и } \sigma_2^m < 0.$$

Критерий разрушения матрицы при растяжении аналогичен критерию разрушения волокна при поперечном растяже-

нии, отличие заключается в отсутствии несоосности в рассматриваемой области:

$$f_m = g \left(\frac{\sigma_2}{Y_{is}^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{is}^T} \right)^2 + (1 - g) \left(\frac{\sigma_2}{Y_{is}^T} \right) \quad \text{при } \sigma_2 \geq 0,$$

где f_m - индекс разрушения волокна.

Для первого случая (при $\sigma_1 \geq -Y_C$)

При разрушении матрицы при сжатии в зависимости от величины продольной нагрузки рассматриваются два случая.

$$f_m = g \left(\frac{\tau_{eff}^T}{S^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{eff}^L}{S_{is}^L} \right)^2 \quad \text{при } \sigma_1 \geq Y_C \text{ и } \sigma_2 \leq 0,$$

где Y_C - предел прочности в поперечном направлении при сжатии, $\tau_{eff}^T = -\sigma_2 \cos(\alpha_0)(\sin(\alpha_0) - \eta^T \cos(\alpha_0))$; $\tau_{eff}^L = \cos(\alpha_0)|\tau_{12}| + \eta_L \cos(\alpha_0)$ - эффективные напряжения сдвига при сжатии матрицы (вычисляются на основании критерия Ку-

лона - Мора, который связывает эффективные напряжения сдвига на круге Мора в плоскости разрушения).

Для второго случая ($\sigma_1 < -Y_C$) выражение для индекса разрушения записывается в следующем виде:

$$f_m = g \left(\frac{\tau_{eff}^{mT}}{S^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{eff}^{mL}}{S_{is}^L} \right)^2 \quad \text{при } \sigma_1 < -Y_C \text{ и } \sigma_2 < 0, \quad (1)$$

$$S^T = Y_C \cos(\alpha_0) \left(\sin(\alpha_0) + \frac{\cos(\alpha_0)}{\tan(2\alpha_0)} \right).$$

Эффективные напряжения сдвига для выражения (1) в области несоосности вычисляются с учётом ее расположения:

$$\tau_{eff}^{mT} = -\sigma_2 \cos(\alpha)(\sin(\alpha) - \eta^T \cos(\alpha));$$

$$\tau_{eff}^{mL} = \cos(\alpha)|\tau_{12}| + \eta_L \cos(\alpha).$$

Материал монослоя имеет следующие прочностные характеристики: $X_T = 3042$ МПа, $X_C = 1246$ МПа, $Y_T = 63$ МПа, $Y_C = 217$ МПа, $S_{12} = 96$ МПа, где X_T - предел прочности в продольном направлении при растяжении, Y_T - предел прочности в поперечном направлении при растяжении, S_{12} - предел прочности при сдвиге в плоскости листа. Жёсткостные характеристики: $E_1 = 175$ ГПа, $E_2 = 8,5$ ГПа, $G_{12} = 3,2$ ГПа, $\mu_{12} = 0,32$, $\rho = 1500$ кг/м³, где μ_{12} - коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное

сжатие в продольном направлении, ρ - плотность.

Характеристики монослоя получены экспериментально на образцах по европейским стандартам EN для режима RTD (Room Temperature Dry): нормальная температура +23°C, влажность - в состоянии поставки. Состояние поставки образцов - состояние, в котором находятся образцы сразу после изготовления (содержание влаги не превышает 10 % от максимального влагонасыщения при относительной влажности 85 %).

Результаты расчёта

На рис. 3 показано распределение нормальных напряжений σ_1 вдоль волокна для слоя № 3 (90°) в момент времени 0,46

мс. На рис. 4-7 показано распределение индекса разрушения f в конструкции при наличии и отсутствии повреждений.

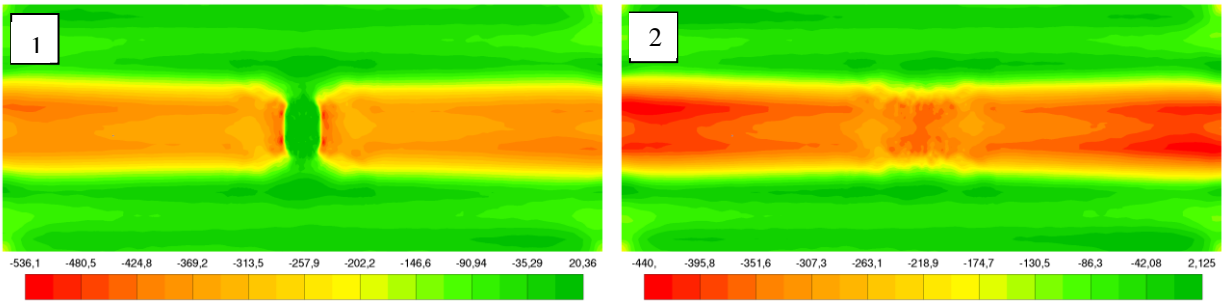


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений вдоль волокна (МПа):
1 - конструкция с повреждениями; 2 - конструкция без повреждений

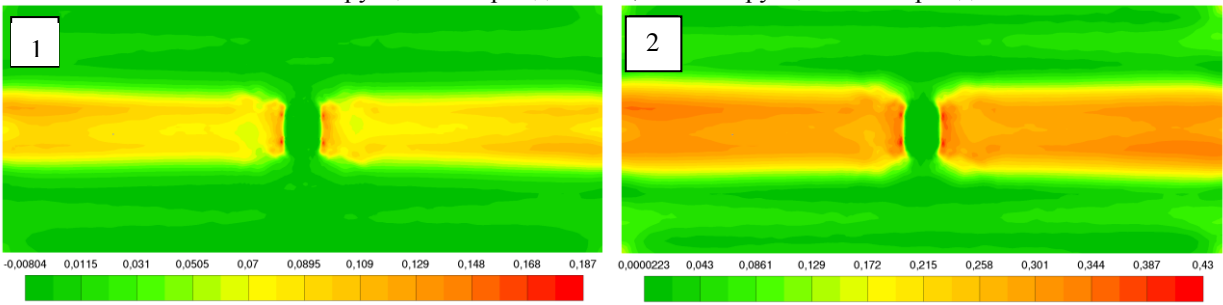


Рис. 4. Распределение индекса разрушения волокна при наличии повреждений:
1 - Chang-Chang; 2 - Hashin

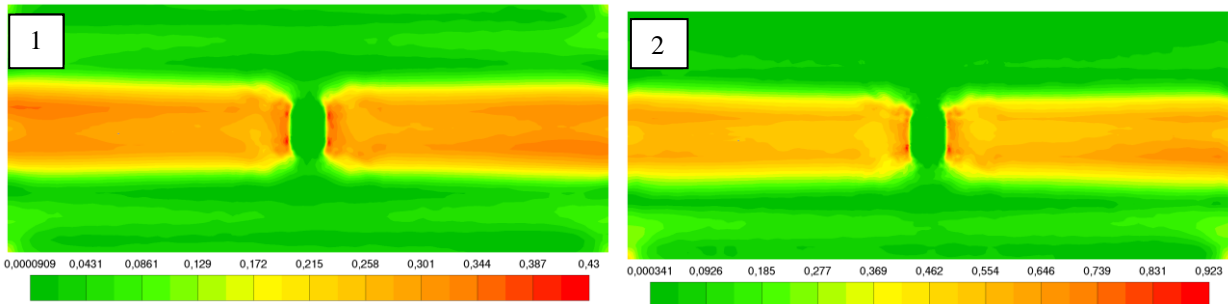


Рис. 5. Распределение индекса разрушения волокна при наличии повреждений:
1 - Puck; 2 - LaRC03

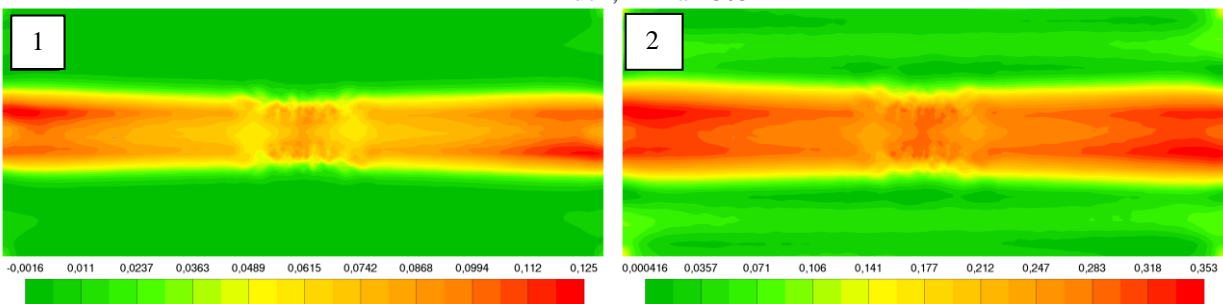


Рис. 6. Распределение индекса разрушения волокна в конструкции без повреждений:
1 - Chang-Chang; 2 - Hashin

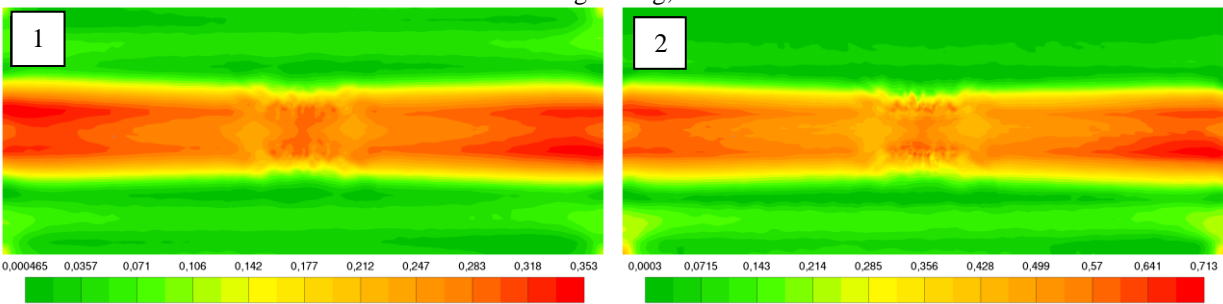


Рис. 7. Распределение индекса разрушения волокна в конструкции без повреждений:
1 - Puck; 2 - LaRC03

На рис. 8 и 9 показаны эпюры вертикальных перемещений центрального сечения панели вдоль длинной стороны для

различных моментов времени для случаев наличия и отсутствия повреждений.

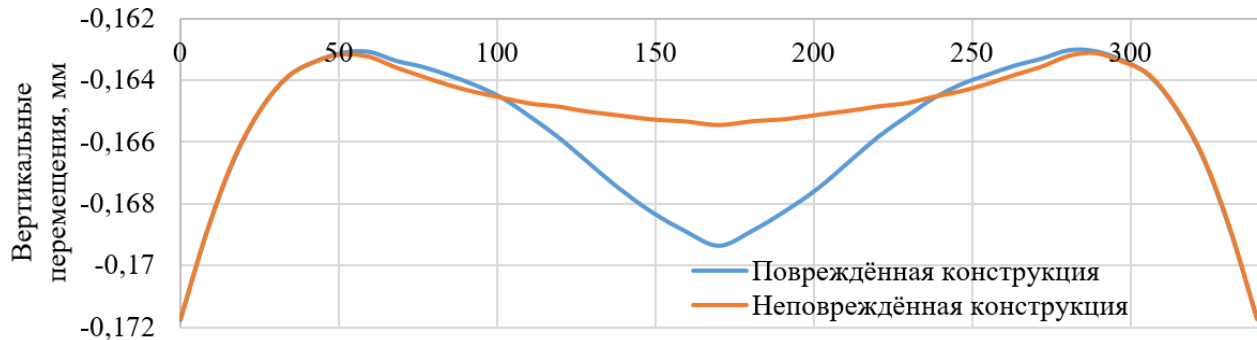


Рис. 8. Распределение вертикальных перемещений центрального сечения вдоль длинной стороны в момент времени 0,08 мс

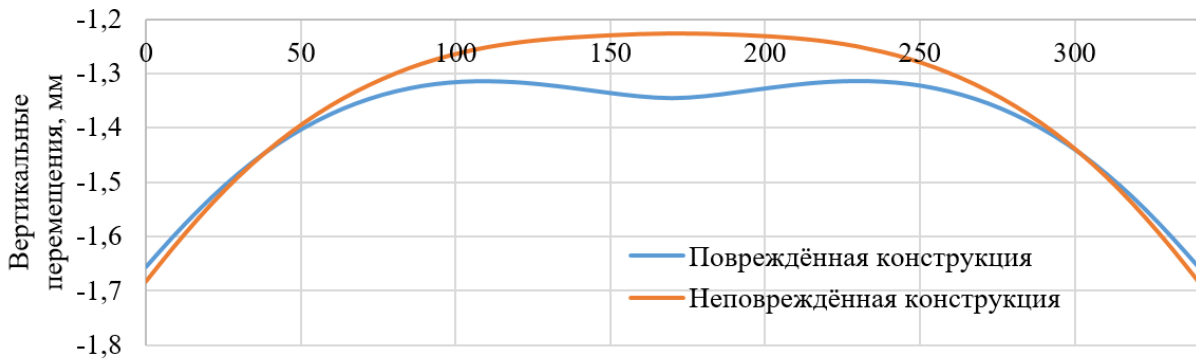


Рис. 9. Распределение вертикальных перемещений центрального сечения вдоль длинной стороны в момент времени 0,46 мс

Из рис. 3 следует, что действующие нормальные напряжения сжатия вдоль волокна в области повреждения в подстриггерной зоне в случае поврежденной конструкции в слое № 3 (90°) в момент времени 0,46 мс больше на 18 %, чем в случае неповрежденной конструкции. Максимальное значение индекса разрушения для реализуемой формы разрушения (сжатие волокна, растяжение матрицы) достигается при использовании критерия разрушения LaRC03 (0,923), минимальное значение - по критерию Chang-Chang (0,187). Критерии Hashin и Puck дают одинаковое распределение, так как зависимость при сжатии волокна у этих критериев идентичная. Максимальное увеличение индекса разрушения при наличии повреждений получается для критерия LaRC03 - ≈ 23 %.

Также видно, что максимальный прогиб в центре поврежденной конструкции для момента времени 0,08 мс больше на $\approx 2,5$ %, а для момента времени 0,46 мс больше на ≈ 9 %, чем для неповрежденной конструкции.

На рис. 10 показано распределение нормальных напряжений вдоль волокна для слоя № 3 (90°) в момент времени 0,4 мс. На рис. 11-14 показано распределение индекса разрушения в конструкции при наличии и отсутствии повреждений.

Из рис. 10 следует, что действующие нормальные напряжения сжатия вдоль волокна в области повреждения в межстриггерной зоне в случае поврежденной конструкции в слое № 3 (90°) в момент времени 0,46 мс больше на 10 %, чем в случае неповрежденной конструкции.

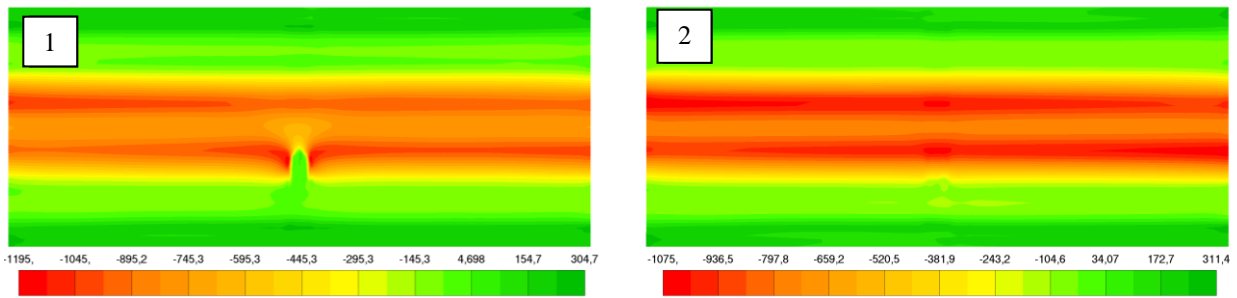


Рис. 10. Распределение нормальных напряжений вдоль волокна (МПа):
1 - конструкция с повреждениями; 2 - конструкция без повреждений

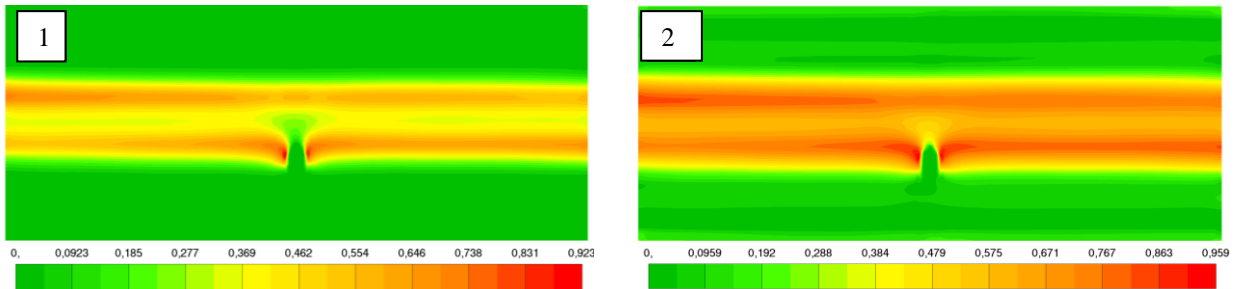


Рис. 11. Распределение индекса разрушения волокна при наличии повреждений:
1 - Chang-Chang; 2 - Hashin

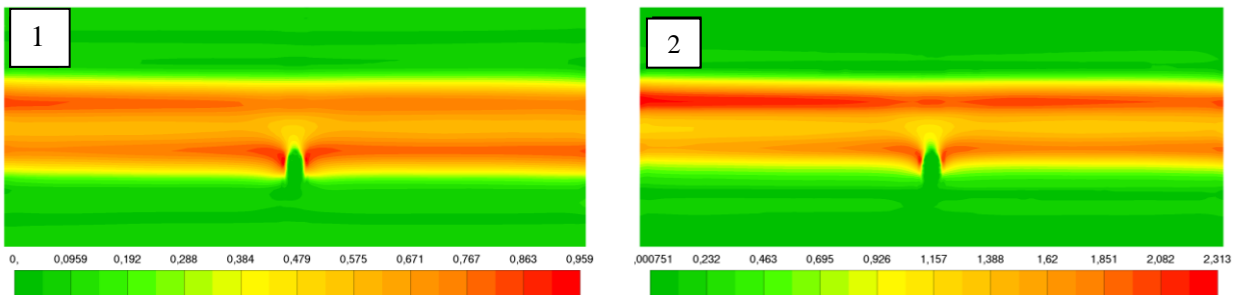


Рис. 12. Распределение индекса разрушения волокна при наличии повреждений:
1 - Puck; 2 - LaRC03

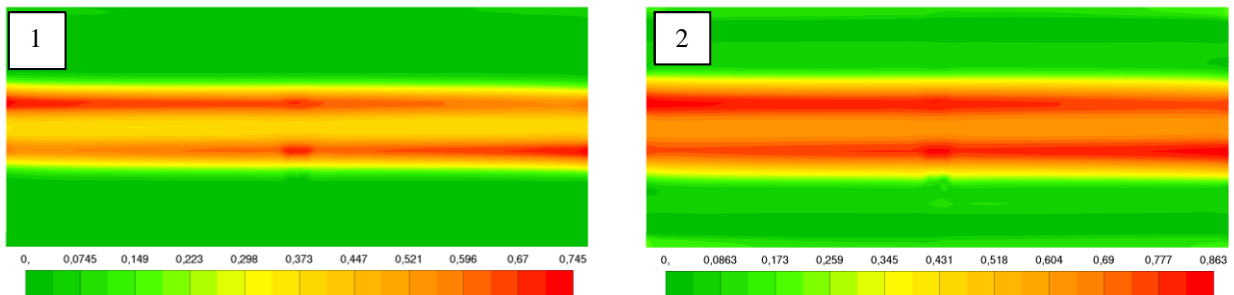


Рис. 13. Распределение индекса разрушения волокна в конструкции без повреждений:
1 - Chang-Chang; 2 - Hashin

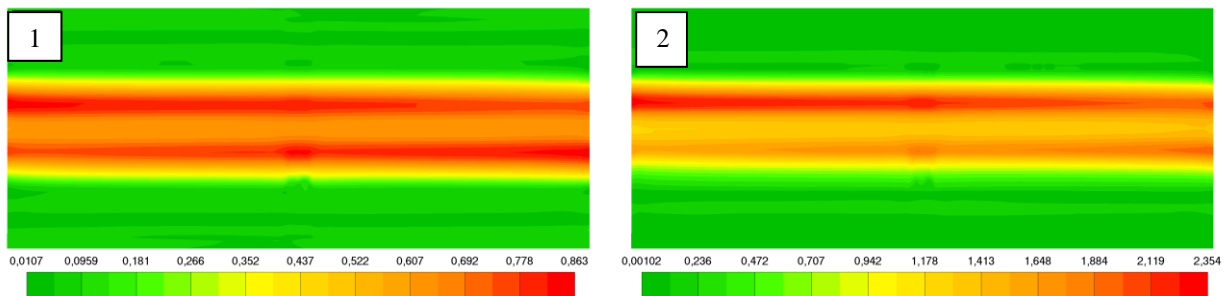


Рис. 14. Распределение индекса разрушения волокна в конструкции без повреждений:
1 - Puck; 2 - LaRC03

Максимальное значение индекса разрушения для реализуемой формы разрушения (сжатие волокна, сжатие матрицы) достигается при использовании критерия разрушения LaRC03 (2,31), минимальное значение - по критерию Chang-Chang (0,923).

Заключение

Методика моделирования и расчёта, предложенная в работе, позволяет учитывать влияние внутренних повреждений, произвольно расположенных в плане и по

По критериям Hashin и Puck индекс разрушения равен 0,959. Максимальное увеличение индекса разрушения при наличии повреждений получается для критерия Chang-Chang - $\approx 19,3\%$.

толщине панели, при исследовании поведения и разрушения подкреплённых композитных панелей при нестационарных воздействиях различного характера.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 18-08-01153 А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мэттьюз, Ф. Композитные материалы. Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. - М.: Техносфера, 2004. - 408 с.
2. Биргер, И.А. Прочность, устойчивость, колебания: справочник: в 3 т. / И.А. Биргер, Я.Г. Пановко. - М.: Машиностроение, 1968. - Т. 3. - 463 с.
3. Кармишин, А.В. Нестационарная аэроупругость тонкостенных конструкций / А.В. Кармишин, Э.Д. Скурлатов, В.Г. Старцев, В.А. Фельдштейн. - М.: Машиностроение, 1982. - 240 с.
4. Hashin, Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites / Z. Hashin // Journal of Applied Mechanics. - 1980. - Vol. 47. - P. 329-334.
5. Puck, A. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models / A. Puck, H. Schurmann // Composites Science and Technology. - 1998. - Vol. 58. - P. 1045-1067.
6. Puck, A. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models / A. Puck, J. Kopp, M. Knops // Composites Science and Technology. - 2002. - Vol. 62. - P. 1633-1662.
7. Puck, A. Guidelines for the determination of the parameters in Puck's action plane strength criterion / A. Puck, J. Kopp, M. Knops // Composites Science and Technology. - 2002. - Vol. 62. - P. 371-378.
8. Chang, F.K. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentration / F.K. Chang, K.Y. Chang // Journal of Composite Materials. - 1987. - Vol. 21. - P. 834-855.
9. Муйземнек, А.Ю. Механика деформирования и разрушения полимерных слоистых композиционных материалов / А.Ю. Муйземнек, Е.Д. Карташова. - Пенза: Изд-во ПГУ, 2017. - 56 с.
10. Sebaey, T.A. Numerical investigation to prevent crack jumping in Double Cantilever Beam test of multidirectional composite laminates / T.A. Sebaey, N. Blanco, C.S. Lopes, J. Costa // Composites Science and Technology. - 2011. - Vol. 71. - P. 1587-1592.
1. Matthews, F. *Composites. Mechanics and Technology* / F. Matthews, R. Rollings. - M.: Technosphere, 2004. - pp. 408.
2. Birger, I.A. *Strength, Stability, Oscillation: reference book: in 3 Vol.* / I.A. Birger, Ya.G. Panovko. - M.: Mechanical Engineering, 1968. - Vol.3. - pp. 463.
3. Karmishin, A.V. *Non-stationary Elasticity of Thin-walled Structures* / A.V. Karmishin, E.D. Skurlatov, V.G. Startsev, V.A. Feldstein. - M.: Mechanical Engineering, 1982. - pp. 240.
4. Hashin, Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites / Z. Hashin // Journal of Applied Mechanics. - 1980. - Vol. 47. - P. 329-334.
5. Puck, A. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models / A. Puck, H. Schurmann // Composites Science and Technology. - 1998. - Vol. 58. - P. 1045-1067.
6. Puck, A. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models / A. Puck, J. Kopp, M. Knops // Composites Science and Technology. - 2002. - Vol. 62. - P. 1633-1662.
7. Puck, A. Guidelines for the determination of the parameters in Puck's action plane strength criterion / A. Puck, J. Kopp, M. Knops // Composites Science and Technology. - 2002. - Vol. 62. - P. 371-378.
8. Chang, F.K. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentration / F.K. Chang, K.Y. Chang // Journal of Composite Materials. - 1987. - Vol. 21. - P. 834-855.
9. Muizemnek, A.Yu. *Mechanics of Deformation and Destruction of Polymeric Laminated Composites* /

A.Yu. Muizemnek, E.D. Kartashova. – Penza: PSU Publishers, 2017. – pp. 56.
10. Sebaey, T.A. Numerical investigation to prevent crack jumping in Double Cantilever Beam test of

multidirectional composite laminates / T.A. Sebaey, N. Blanco, C.S. Lopes, J. Costa // Composites Science and Technology. - 2011. - Vol. 71. - P. 1587-1592.

Статья поступила в редакцию 3.06.19

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета,
гл. редактор журнала «Вестник БГТУ»*

Киричек А.В.

Статья принята к публикации 27. 06. 19.

Сведения об авторах:

Медведский Александр Леонидович, д.физ.-мат.н., профессор Московского физико-технического института (государственного университета), e-mail: mdv66@mail.ru.

Мартыросов Михаил Иванович, к.т.н., доцент Московского авиационного института (националь-

ного исследовательского университета), e-mail: vst@vst-st.ru.

Хомченко Антон Васильевич, инженер-конструктор 1 категории ПАО «Корпорация «Иркут», e-mail: KhomchenkoAnton@yandex.ru.

Medvedsky Alexander Leonidovich, Dr. Sc. Phys-Math, Prof., Moscow Physical Technical Institute (State University), e-mail: mdv66@mail.ru.

Martirosov Michail Ivanovich, Can. Sc. Tech, Assistant Prof., Moscow Aircraft Institute (National research University), e-mail: vst@vst-st.ru.

Khomchenko Anton Vasilievich, Design Engineer of the I-st category PC “Irkut” Corporation”, e-mail: KhomchenkoAnton@yandex.ru.