

УДК 539.3

DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-2-127-134

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Численный анализ поведения слоистой композитной панели с межслоевыми дефектами под действием динамических нагрузок

А.Л. Медведский¹, М.И. Мартиросов², А.В. Хомченко^{3*}¹Московский физико-технический институт (государственный университет), Российская Федерация, Московская область, 141701, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4³ПАО «Корпорация «Иркут»», Российская Федерация, 125315, Москва, Ленинградский проспект, 68

*khotchenkoanton@yandex.ru

Поступила в редакцию: 11 января 2019 г.

Доработана: 10 марта 2019 г.

Принята к публикации: 26 марта 2019 г.

Ключевые слова:

композитная панель;
критерии разрушения композитов;
межслоевой дефект;
нестационарная нагрузка;
численное моделирование;
метод конечных элементов (МКЭ)

Аннотация

Цели. Основная задача состояла в рассмотрении поведения прямоугольной слоистой панели из однонаправленного полимерного композиционного материала (ПКМ) при наличии межслоевых дефектов под действием динамических нагрузок различного характера.

Методы. В ходе исследования рассчитаны формы собственных колебаний прямоугольной композитной панели при наличии множественных расслоений в форме эллипсов различных размеров. Построены зависимости максимальных прогибов от частоты воздействия стационарного поля давления. Определены поля распределения индексов разрушения слоев панели под действием нестационарного поля давления с помощью различных критериев разрушения (применительно к ПКМ).

Результаты. Проведен анализ разрушения панели с использованием различных критериев разрушения изделий из композитных материалов. По результатам исследования разработана методика моделирования поведения композитных панелей при наличии множественных межслоевых дефектов при воздействии динамических нагрузок различного характера.

Введение

Композиционные конструкционные материалы отличаются от металлических пониженными пластическими свойствами и, следовательно, повышенной чувствительностью к динамическим нагрузкам ударного характера. В результате эксплуатации и внешних воздействий в композитных пакетах могут возникать дефекты, которые сопровождаются растрескиванием матрицы, разрушением волокон и монослоев, что оказывает влияние на несущую способность элементов конструкций из ПКМ [1].

Такие материалы широко используются в различных машиностроительных отраслях, а также в строительной индустрии (например, звукоизоляционные слоистые композитные панели для современных научно-исследовательских лабораторий).

В статье рассмотрено разрушение панели с использованием критериев разрушения композитов Tsai – Hill [1], Hoffman [4], Puppo – Evensen [5], Puck [6–8], Hashin [9], Norris [10], Fischer [11], Norris – McKinnon [12], DeAlia [13].

1. Постановка задачи

Рассматривается плоская прямоугольная панель (рис. 1), представляющая собой многослойную конструкцию, состоящую из 12 монослоев, каж-

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

© Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

дый из которых изготовлен из однородного упругого ортотропного материала. Укладка монослоев панели имеет вид $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$, толщина монослоя – h .

Предполагается, что в панели присутствуют межслоевые дефекты эллиптической формы (рис. 2), расположенные по толщине в соответствии со схемами, представленными на рис. 3–5.

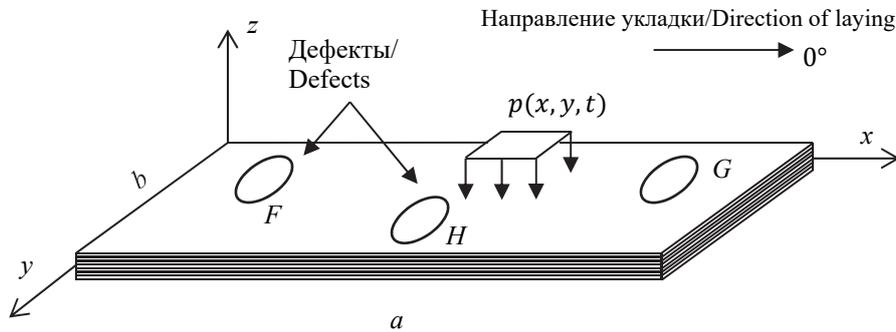


Рис. 1. Прямоугольная многослойная панель с дефектами
[Figure 1. Rectangular multi-layered panel with defects]

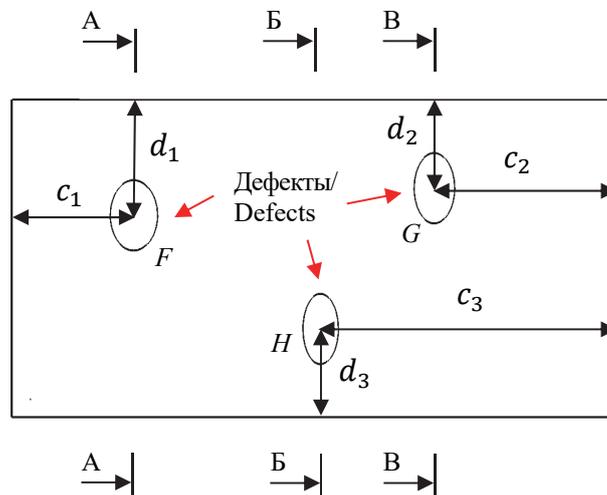


Рис. 2. Расположение дефектов в плоскости панели
[Figure 2. The location of defects in the plane of the panel]

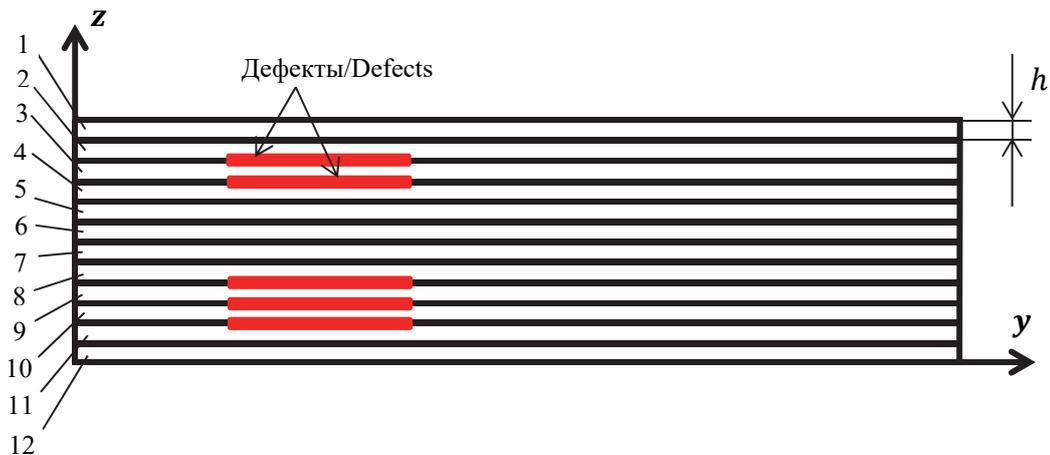


Рис. 3. Положения дефектов по толщине (А–А)
[Figure 3. The position of the defects in thickness (A–A)]

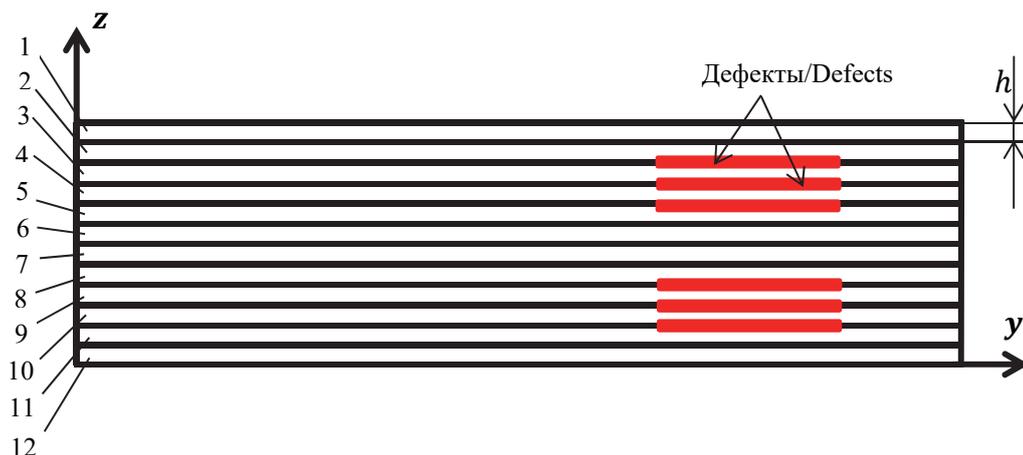


Рис. 4. Положения дефектов по толщине (Б–Б)
[Figure 4. The position of the defects in thickness (B–B)]

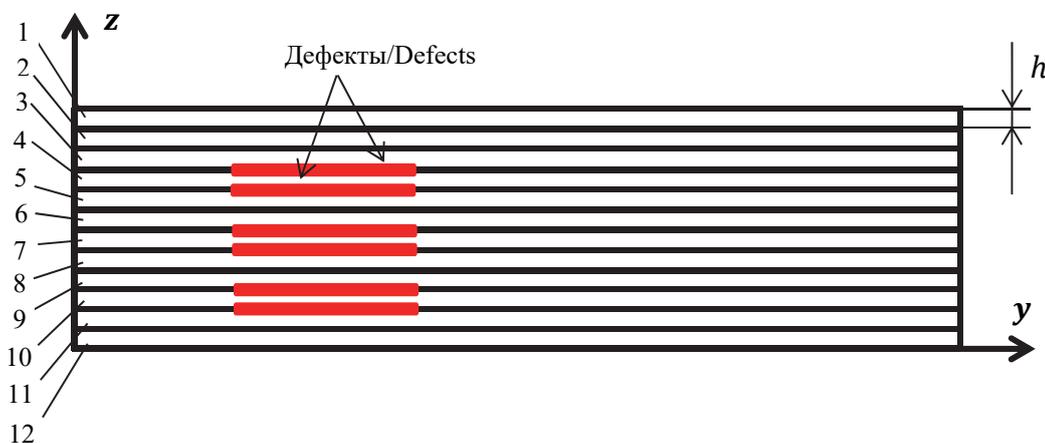


Рис. 5. Положения дефектов по толщине (Б–Б)
[Figure 5. The position of the defects in thickness (B–B)]

Рассматривается поведение панели в полях стационарного и нестационарного давления.

2. Панель в поле стационарного давления

В качестве числового примера рассмотрим плоскую прямоугольную панель длиной $a = 532$ мм и шириной $b = 282$ мм (рис. 1).

Материал панели – углепластик на основе препрега HexPly M21/34%/UD194/IMA-12K (углеродная лента IMA на основе высокопрочного волокна HexTow IMA-12K и эпоксидное модифицированное связующее M21), произведенного фирмой Hexcel (США).

Препрег представляет собой набор углеродных жгутов, собранных в ленту без утка. Лента пропитана связующим по технологии Hot Melt, т.е. связующее в виде пленки совмещается с наполнителем с двух сторон и под давлением каланд-

ров при повышенной температуре сплавляется. Лента по сравнению с тканью обладает лучшей сопротивляемостью однонаправленным нагрузкам, менее пориста, обладает большей прочностью и жесткостью, меньшей стоимостью сырья, но большей стоимостью производства.

Такой препрег предназначен для изготовления изделий по автоклавной технологии. Характеристики монослоя известны: паспортные данные производителя, полученные экспериментально на образцах по европейским стандартам EN для режима RTD (Room Temperature Dry) – нормальная температура $+23$ °С и влажность – в состоянии поставки. Состояние поставки образцов – состояние, в котором находятся образцы сразу после изготовления, с содержанием влаги, не превышающим 10 % от максимального влагонасыщения при относительной влажности 85 %.

Толщина монослоя равна 0,19 мм. Жесткостные характеристики монослоя: $E_1 = 175$ ГПа, $E_2 = 8,5$ ГПа, $G = 3,2$ ГПа, $\mu_{12} = 0,32$, $\rho = 1500$ кг/м³, где E_1 – модуль упругости в направлении оси x ; E_2 – модуль упругости в направлении оси y ; μ_{12} – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в направлении оси x ; G – модуль упругости при сдвиге в плоскости листа; ρ – плотность. Здесь и далее приведенные механические характеристики соответствуют режиму испытаний RTD.

Расположение межслоевых дефектов указано на рис. 2–5, положения центров расслоений: $d_1 = 102$ мм, $c_1 = 107$ мм, $d_2 = 78,5$ мм, $c_2 = 161$ мм, $d_3 = 78,5$ мм, $c_3 = 261$ мм, дефекты имеют форму эллипса с соотношением осей $F = 1,5$, $G = 1,75$, $H =$

2,0 соответственно. Граничные условия на контуре панели соответствуют жесткому заземлению.

Стационарное поле давления, действующее на панель:

$$p = p_0(x, y)e^{i\omega t}, \quad (1)$$

где ω – циклическая частота, p_0 – амплитуда.

Задача решается с помощью МКЭ в программном комплексе Siemens FEMAP 11.4/NX Nastran. Панель моделируется конечными элементами типа Laminate, а моделирование одностороннего контакта в области межслоевого дефекта проводится с помощью элементов типа Gap.

На рис. 6 показаны формы свободных колебаний и соответствующие им частоты, характерные для «раскрытия» межслоевых дефектов. На рис. 7–9 представлены зависимости максимальных прогибов панели в центре расположения (для каждого слоя) расслоений от частоты гармонического воздействия.

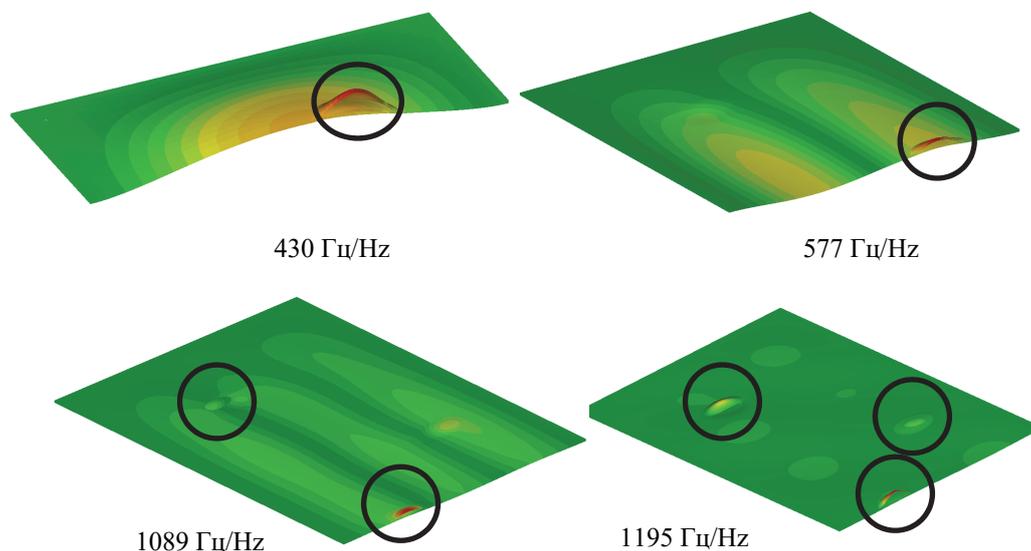


Рис. 6. Собственные формы и частоты, характерные для «раскрытия» расслоения
[Figure 6. Eigenforms and frequencies characteristic of “disclosures” of the bundle]

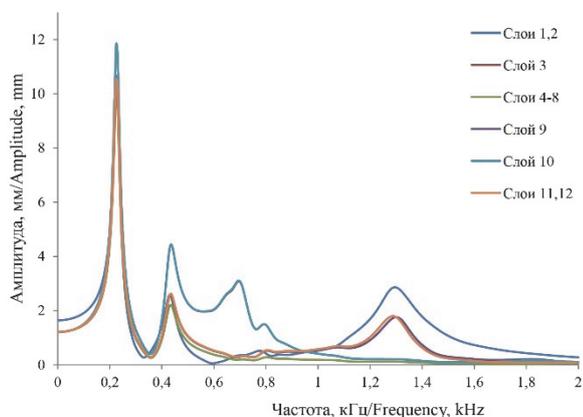


Рис. 7. Зависимость амплитуды от частоты (дефект F)
[Figure 7. Amplitude versus frequency (defect F)]

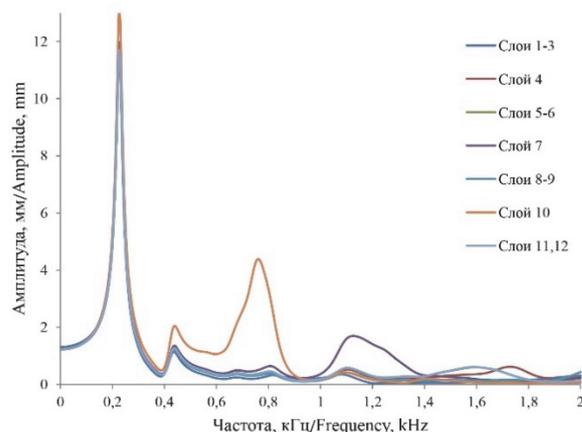


Рис. 8. Зависимость амплитуды от частоты (дефект G)
[Figure 8. Dependence of amplitude on frequency (defect G)]

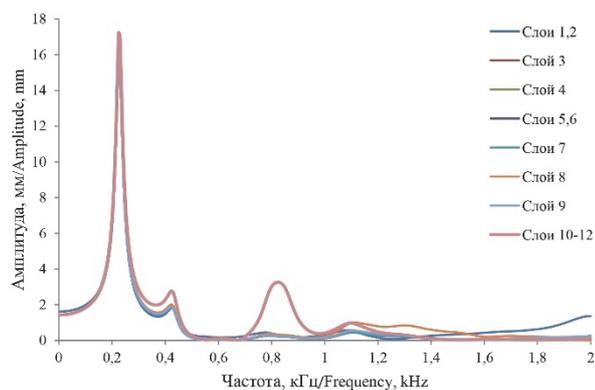


Рис. 9. Зависимость амплитуды от частоты (дефект H)
 [Figure 9. Dependence of amplitude on frequency (defect H)]

3. Панель под действием нестационарной нагрузки

Далее рассматривается задача поведения плоской панели прямоугольной формы при действии мгновенно приложенного равномерного давления на верхнюю поверхность (геометрия, материал и формат укладки соответствуют пунктам 1 и 2). Давление изменяется по закону (1):

$$p(t) = p_0 H(t), \quad (2)$$

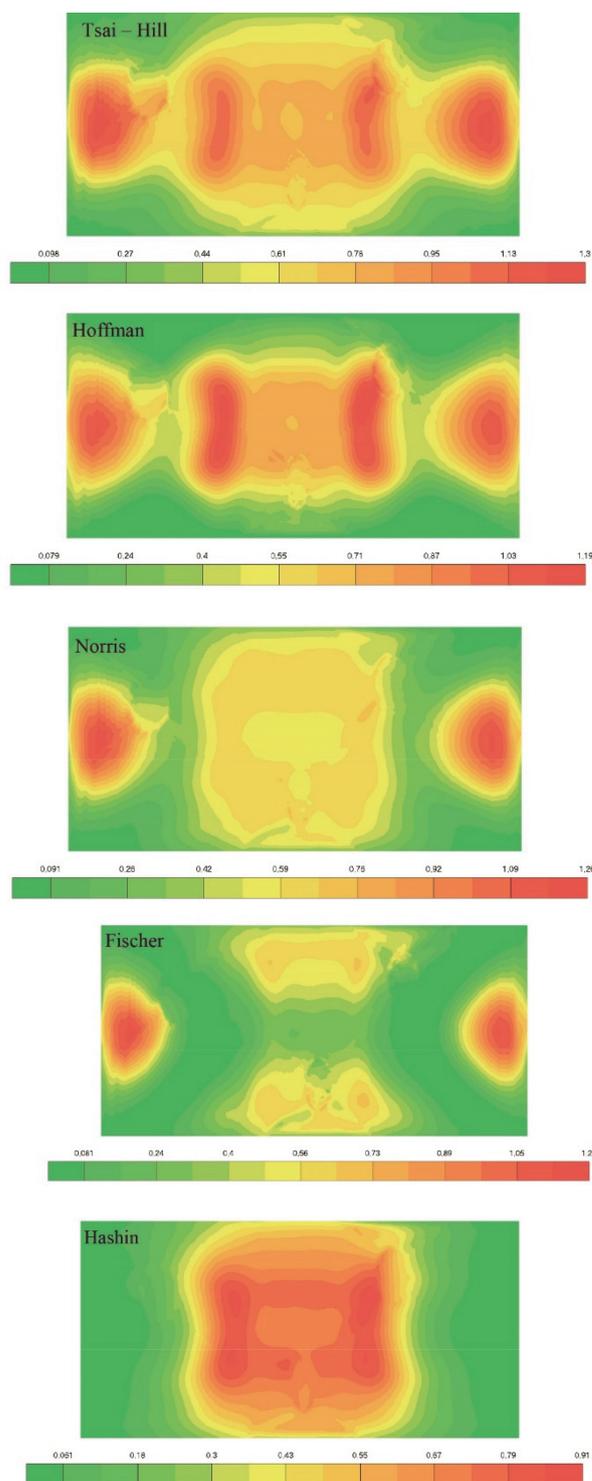
где $H(t)$ – функция Хэвисайда, $p_0 = 1,25$ МПа .

Решение получено с помощью программного комплекса LS-DYNA с применением явной схемы интегрирования полной системы уравнений МКЭ. Слои панели соединены между собой клеевым контактом, что гарантирует равенство прогибов и углов поворотов. Также в модели учитывается контакт в зоне расслоения.

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 направлении оси x при растяжении; X_C – предел прочности в направлении оси x при сжатии; Y_T – предел прочности в направлении оси y при растяжении; Y_C – предел прочности в направлении оси y при сжатии; S_{12} – предел прочности при сдвиге в плоскости листа; σ_1 – нормальное напряжение, действующее в направлении оси x ; σ_2 – нормальное напряжение, действующее в направлении оси y ; τ_{12} – сдвиговое напряжение, действующее в плоскости листа.

На рис. 10 показано распределение индекса разрушения f для слоя № 10 (90°) в момент времени 0,4 мс.

Наименьшее критическое значение индекса разрушения и схожий характер распределения дают критерии разрушения Hashin и DeAlia: $f = 0,91$. Наибольшее значение $f = 1,3$ дают критерии Tsai – Hill, Norris – McKinnon, Puppo – Evensen. Отличие критериев Hoffman, Norris, Fischer, Puck в среднем составляет 10 %.



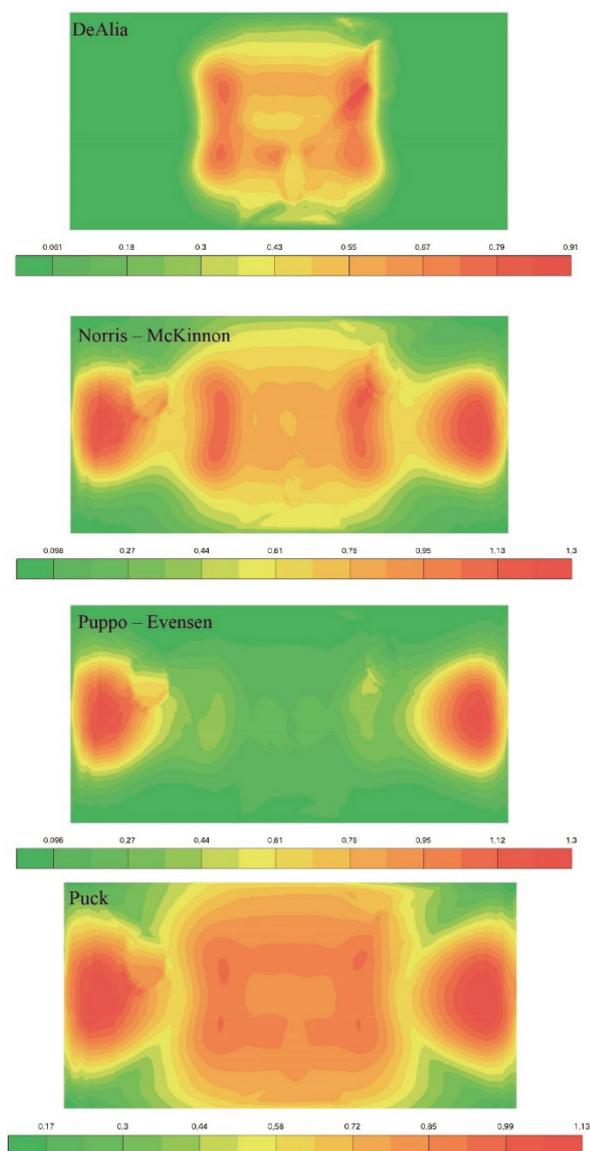


Рис. 10. Значения индекса разрушения
[Figure 10. The values of the index of destruction]

Заключение

Предложенная методика численного моделирования поведения композитных панелей с учетом множественных межслоевых дефектов под действием динамических нагрузок может быть использована при проектировании элементов конструкций из ПКМ.

Список литературы

1. Медведский А.Л., Мартirosов М.И., Хомченко А.В. Численное моделирование поведения пластины из полимерного композита под действием динамических нагрузок при наличии множественных дефектов между слоями // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 10. С. 271–278.

2. Azzi V.D., Tsai S.W. Anisotropic strength of composites // Experimental Mechanics. 1965. Vol. 5. No. 9. Pp. 283–288.

3. Tsai S.W., Wu E.M. A general theory of strength for anisotropic materials // Journal of Composite Materials. 1971. No. 5. Pp. 58–80.

4. Hoffman N.O. The brittle strength of orthotropic materials // Journal of Composite Materials. 1967. Vol. 1. No. 2. Pp. 200–206.

5. Puppo A.H., Evensen H.A. Strength of anisotropic materials under combined stresses // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. 1972. Vol. 10. No. 4. Pp. 468–474.

6. 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.

7. Puck A., Kopp J., Knops M. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models // Composites Science and Technology. 2002. Vol. 62. Pp. 1633–1662.

8. Puck A., Kopp J., Knops M. Guidelines for the determination of the parameters in Puck's action plane strength criterion // Composites Science and Technology. 2002. Vol. 62. Pp. 371–378.

9. Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites // Journal of Applied Mechanics. 1980. Vol. 47. Pp. 329–334.

10. Norris C.B. Strength of orthotropic materials subjected to combined stress // U.S. Forest Products Laboratory. 1962. Report No. 1816.

11. Fischer L. Journal of Engineering for Industry // Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. 1967. Vol. 89. Pp. 389–402.

12. Norris C.B., McKinnon P.F. Compression, tension and shear tests on yellow-poplar plywood panels of sizes that do not buckle with tests made at various angles to the face grain // U.S. Forest Products Laboratory. 1962. Report No. 1328.

13. Sandhu P. A survey of failure theories of isotropic and anisotropic materials. APFDL-TR-72-71. 1972.

Об авторах

Медведский Александр Леонидович – доктор физико-математических наук, профессор, Московский физико-технический институт (государственный университет). *Область научных интересов:* волновая динамика, теория тонких оболочек. *Контактная информация:* e-mail – mdv66@mail.ru

Мартirosов Михаил Иванович – кандидат технических наук, доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). *Область научных интересов:* механика композиционных материалов, волновая динамика. *Контактная информация:* e-mail – vst@vst-st.ru

Хомченко Антон Васильевич – инженер-конструктор 1 категории, ПАО «Корпорация «Иркут»». *Область научных интересов:* механика композиционных материалов, численное моделирование. *Контактная информация:* e-mail – khomchenkoanton@yandex.ru

Для цитирования

Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численный анализ поведения слоистой композитной панели с межслоевыми дефектами под действием ди-

намических нагрузок // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 2. С. 127–134. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-2-127-134

RESEARCH PAPER

Numerical analysis of layered composite panel behavior with interlaminar defects subject to dynamic loads

Aleksandr L. Medvedskiy¹, Mikhail I. Martirosov², Anton V. Khomchenko^{3*}

¹Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutsky Pereulok, Dolgoprudny, 141701, Moscow region, Russian Federation

²Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation

³Irkut Corporation, 68 Leningradsky Prospect, Moscow, 125315, Russian Federation

*khomchenkoanton@yandex.ru

Received: January 11, 2019

Revised: March 10, 2019

Accepted: March 26, 2019

Keywords:

composite panel;
composite failure criteria;
interlaminar defect;
nonstationary load;
numerical modeling;
finite element method (FEM)

Abstract

Aims of research. Polymer unidirectional composite laminate panel behavior with interlaminar defects under action of different dynamic loads is considered.

Methods. Normal modes and eigenvalues of rectangular composite panels in the presence of multiple delamination of different sizes in ellipsoidal form are calculated. The dependences of the maximum deflections from the frequency of the stationary pressure field action are constructed. Distribution field of panels failure index under action of nonstationary pressure field by using different failure criteria for composites is determined.

Results. Modeling methodology of composite panels behavior in the presence of multiple interlaminar defects under action of different dynamic loads is developed. Analysis of failure panel with the use of different failure criteria for composites is carried out.

References

1. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V. (2018). Численное моделирование поведения пластины из полимерного композита под действием динамических нагрузок при наличии множественных дефектов между слоями [Numerical modeling of polymer composite plate behavior under action of dynamic load at presence multiple defects between plies]. *Tidings of TSU. Technical science*, (10), 271–278. (In Russ.)

2. Azzi V.D., Tsai S.W. (1965). Anisotropic strength of composites. *Experimental Mechanics*, 5(9), 283–288.

3. Tsai S.W., Wu E.M. (1971). A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*, (5), 58–80.

4. Hoffman N.O. (1967). The brittle strength of orthotropic materials. *Journal of Composite Materials*, 1(2), 200–206.

5. Puppo A.H., Evensen H.A. (1972). Strength of anisotropic materials under combined stresses. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 10(4), 468–474.

6. Puck A., Schurmann H. (1998). Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. *Composites Science and Technology*, (58), 1045–1067.

7. Puck A., Kopp J., Knops M. (2002). Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. *Composites Science and Technology*, (62), 1633–1662.

8. Puck A., Kopp J., Knops M. (2002). Guidelines for the determination of the parameters in Puck's action plane strength criterion. *Composites Science and Technology*, (62), 371–378.

9. Hashin Z. (1980). Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites. *Journal of Applied Mechanics*, (47), 329–334.

10. Norris C.B. (1962). Strength of orthotropic materials subjected to combined stress. *U.S. Forest Products Laboratory. Report No. 1816*.

11. Fischer L. (1967). *Journal of Engineering for Industry. Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.*, 89, 389–402.

12. Norris C.B., McKinnon P.F. (1962). Compression, tension and shear tests on yellow-poplar plywood panels of sizes that do not buckle with tests made at various angles to the face grain. *U.S. Forest Products Laboratory. Report No. 1328*.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (Project № 18-08-01153 A).

13. Sandhu P. (1972). A survey of failure theories of isotropic and anisotropic materials. APFDL-TR-72-71.

About the authors

Aleksandr L. Medvedskiy – DSc in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Moscow Institute of Physics and Technology (State University). *Research interests:* wave dynamic, thin shell theory. *Contacts:* e-mail – mdv66@mail.ru

Mikhail I. Martirosov – PhD in Technical Sciences, Docent, Moscow Aviation Institute (National Research University). *Research interests:* mechanics of composites, wave dynamic. *Contacts:* e-mail – vst@vst-st.ru

Anton V. Khomchenko – Design Engineer 1 Category, Irkut Corporation. *Research interests:* mechanics of composites, numerical modeling. *Contacts:* e-mail – khomchenkoanton@yandex.ru

For citation

Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V. (2019). Numerical analysis of layered composite panel behavior with interlaminar defects subject to dynamic loads. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(2), 127–134. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-2-127-134