

УДК 539.3

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-12-19-30

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

## ВЛИЯНИЕ МЕЖСЛОЕВЫХ ДЕФЕКТОВ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НА ПОВЕДЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ДЕЙСТВИИ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗОК

Исследовано влияние внутренних дефектов типа расслоений эллиптической формы на поведение прямоугольной пластины из углепластика при воздействии статической и динамической нагрузок.

Получено распределение напряжений в слоях пластины при воздействии статической и динамической нагрузок. Определено распределение ин-

дексов разрушения с использованием различных критериев разрушения для однонаправленных композиционных материалов (на основе углеленты).

**Ключевые слова:** пластина, метод, конечные элементы, дефекты, критерии, разрушения, композиты.

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

## IMPACT OF INTERLAMINAR ELLIPTICAL DEFECTS UPON BEHAVIOR OF RECTANGULAR CARBON PLASTIC PLATE AT STATIC AND DYNAMIC LOADS

The purpose of this work is to investigate the impact of the inner defects of elliptical stratification type upon behavior of the rectangular carbon plastic plate at the impact of static and dynamic loads.

The investigation methods: the problem is solved in a numerical way with the aid of a finite element method (FEM) in the LS-DYNA software complex (Livermore Software Technology Corp.).

The investigation results: the distribution of stresses in plate layers under the impact of static and dynamic loads is obtained. The distribution of destruction indices with the use of different destruction criteria

for unidirectional composites (on the basis of carbon band) is defined.

Conclusions: the impact of defects of the type of specified shape stratification, dimensions, amount and places of location with regard to the plate under consideration under the action of compressive static load does not practically tell. Under the action of the compressive dynamic load there is observed a noticeable impact of inner defects upon rectangular plate behavior.

**Key words:** plate, method, finite elements, defects, criteria, destruction, composites.

### Введение

В результате эксплуатации и внешних воздействий, а также в процессе производства в композитных пакетах (КП) могут возникать дефекты, которые сопровождаются растрескиванием матрицы, разрушением волокон и монослоев, что оказывает влияние на прочность и несущую способность изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), например, углепластиков. Классическими дефектами в элементах конструкций из ПКМ являются, например: непрочность – нарушение адгезионной связи между монослоями; и расслоение – нарушение адгезионной связи между слоями наполнителя в КП, вызванное механическими воздействиями

ударного характера или внутренними напряжениями в изделии после формования или после проведения сборочно-монтажных работ. Такие дефекты относятся к внутренним, так как охватывают внутренние слои КП. Как показывает практика, во многих случаях дефекты могут быть обнаружены только с использованием дорогостоящих средств неразрушающего контроля (ультразвуковая дефектоскопия, рентгеновская, токовихревая, оптическая голография, акустический контроль).

Определение несущей способности элементов конструкции, выполненных из композиционных материалов под действи-

ем динамической нагрузки при наличии внутренних дефектов – является важной задачей в механике композитов.

В работах [1-3] рассматривалось поведение слоистых элементов конструкций из ПКМ при действии различных динами-

ческих нагрузок. В настоящей работе проводится сравнение влияния действия статической и динамической сжимающей нагрузки на прямоугольную пластину, выполненную из углепластика.

### Постановка задачи

В работе рассматривается прямоугольная пластина из ПКМ длиной  $a = 640$  мм, шириной  $b = 375$  мм (рис. 1). Предполагается, что в центре пластины между слоями № 3-4 и № 4-5 находятся дефекты (типа расслоений) эллиптической формы с осями 106 мм и 45 мм. На рис. 2 показано распределение дефектов по толщине пластины в центральном сечении. Пластина состоит из 12 монослоев со следующей смешанной схемой укладки:  $[+45^\circ/-$

$45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$ . Каждый слой изготовлен из однородного упругого ортотропного материала *Prism EP2400/TX1100 IMS65-24K-UD196-6.35*, который представляет собой однонаправленный углепластик (на основе углеленты), армированный углеродными волокнами *TX1100 IMS 65-24K* фирмы *Tenax*. В качестве связующего используется эпоксидная смола *EP2400* фирмы *Prism*. Толщина монослоя  $h = 0,19$  мм.

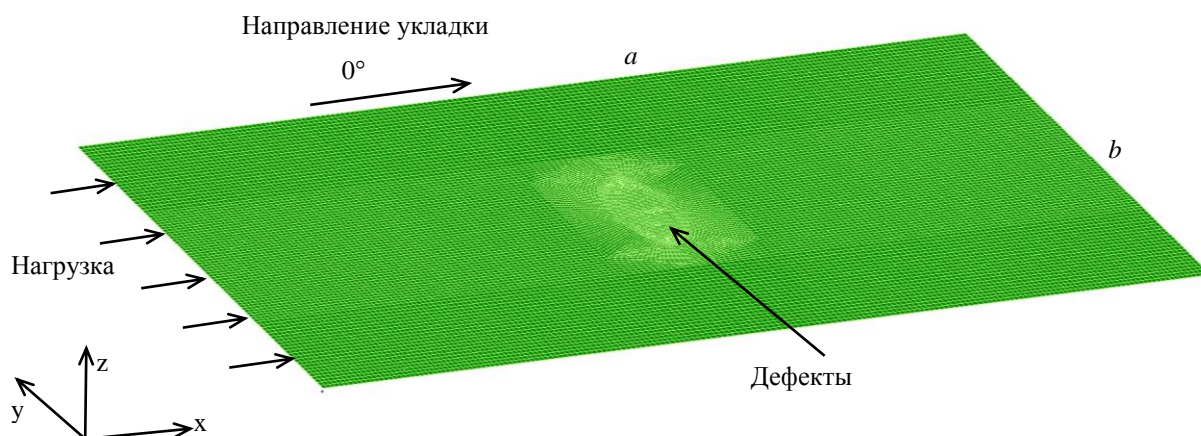


Рис. 1. Конечно-элементная модель прямоугольной пластины из ПКМ

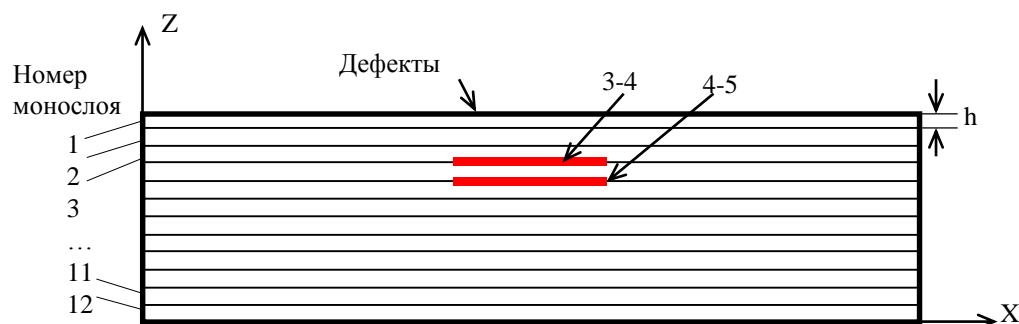


Рис. 2. Расположение дефектов

### Методика исследования

При решении данной задачи использовался метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе *LS-*

*DYNA*. Принципиальный алгоритм имеет следующие этапы:

1. Разработка геометрической модели объекта.
2. Задание характеристик материала.
3. Выбор типов конечных элементов.
4. Создание конечно-элементной сетки.
5. Задание граничных условий.
6. Формирование системы нагрузок.
7. Проверка корректности разработанной модели.
8. Расчёт модели.

#### 9. Анализ результатов.

При создании конечно-элементной модели каждый монослой моделировался отдельным слоем ортотропных десяти узловых объёмных элементов («*SOLID\_ORTHO*»). В местах расположения дефектов учитывались контактные взаимодействия с помощью карты «*AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE*». Всего в модели 234660 конечных элементов.

### Описание нагрузок и граничных условий

В качестве нагрузок, действующих на пластину, рассматривались:

- Осевая сжимающая нагрузка, приложенная к торцу пластины в виде кинематического граничного условия (перемещение торца в осевом направлении на 35 мм). В качестве граничных условий ис-

пользовалось шарнирное опирание торцов пластины.

- Движение торца пластины вдоль оси  $X$  по закону  $v(t) = v_0 P(t)$ , где  $v_0 = 8$  м/с. Зависимость действующей нагрузки  $P(t)$  представлена на рис. 3. В качестве граничных условий использовалось шарнирное опирание торцов пластины.

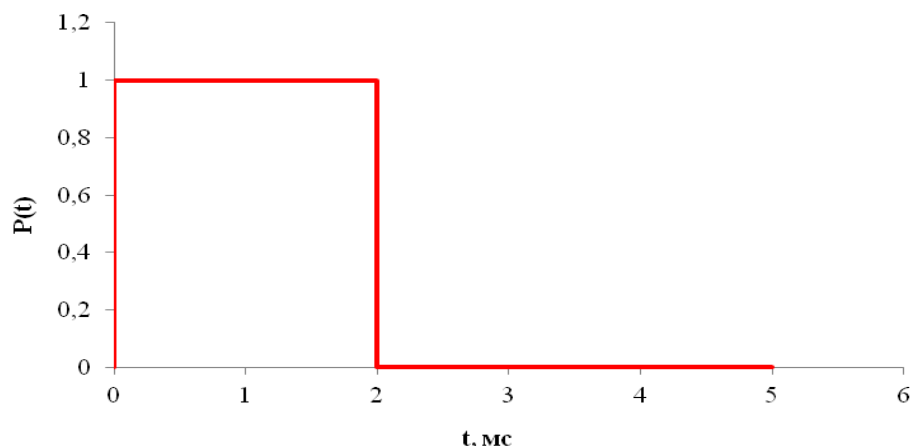


Рис. 3. Зависимость  $P(t)$

В результате проведенных расчётов определяется распределение индекса разрушения  $f$  (разрушение слоя наступает при достижении  $f = 1$ ) по различным критериям разрушения. В данной работе используются следующие критерии разрушения: *Hashin* [4-5], *Puck* [6-8].

Вышеуказанные критерии позволяют оценивать прочность волокна и матрицы

отдельно. Далее, приводятся необходимые зависимости для определения индексов разрушения для критерия *Puck* и *Hashin*.

Критерий *Puck*.

Разрушение при трёхмерном напряженном состоянии можно описать с помощью следующих уравнений:

$$\sigma_n \geq 0: f_E = \sqrt{\left[ \left( \frac{1}{R_{\perp}^{(+)}} - \frac{P_{\perp\psi}^{(+)}}{R_{\perp\psi}^A} \right) \sigma_n \right]^2 + \left( \frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{n\parallel}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2} + \frac{P_{\perp\psi}^{(+)}}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n,$$

$$\sigma_n < 0: f_E = \sqrt{\left(\frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A}\right)^2 + \left(\frac{p_{\perp\psi}^{(-)}}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n\right)^2} + \frac{p_{\perp\psi}^{(-)}}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n,$$

где  $\cos^2 \psi = 1 - \sin^2 \psi = \frac{\tau_{nt}^2}{\tau_{nt}^2 + \tau_{n1}^2}$ ;  $\frac{p_{\perp\psi}^{(\pm)}}{R_{\perp\psi}^A} = \frac{p_{\perp\perp}^{(\pm)}}{R_{\perp\perp}^A} \cos^2 \psi + \frac{p_{\perp\parallel}^{(\pm)}}{R_{\perp\parallel}^A} \sin^2 \psi$ ;  $R_{\perp\perp}^A = \frac{R_{\perp}^{(-)}}{2(1 + p_{\perp\perp}^{(-)})}$ .

Здесь символами  $R$  обозначены параметры сопротивления разрушению и  $p$  – параметры наклона кривых разрушения. Символы  $\perp$  и  $\parallel$  обозначают направление перпендикулярное и параллельное волокнам соответственно.

Критерий прочности формулируется в плоскости разрушения с использованием соответствующих напряжений и деформаций. Выражения для  $\sigma_n$ ,  $\tau_{nt}$ ,  $\tau_{n1}$  в произвольной плоскости с углом наклона  $\theta$ :

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_2 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta + 2\tau_{23} \sin \theta \cos \theta, \\ \tau_{nt} &= (\sigma_3 - \sigma_2) \sin \theta \cos \theta + \tau_{23} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta), \\ \tau_{n1} &= \tau_{31} \sin \theta + \tau_{21} \cos \theta. \end{aligned}$$

Константы критерия прочности Рукс.

По умолчанию устанавливаются следующие значения параметров критерия прочности Рукс для слоев из угле- и стеклопластика:

– углепластик:  $p_{\perp\parallel}^{(+)}=0,35$ ;  $p_{\perp\parallel}^{(-)}=0,3$ ;  
 $p_{\perp\perp}^{(+)}=0,25$ ;  $p_{\perp\perp}^{(-)}=0,2$ ;

– стеклопластик:  $p_{\perp\parallel}^{(+)}=0,3$ ;  $p_{\perp\parallel}^{(-)}=0,25$ ;  
 $p_{\perp\perp}^{(+)}=0,2$ ;  $p_{\perp\perp}^{(-)}=0,2$ .

Критерий Hashin.

Функция критерия прочности волокон при растяжении в направлении волокон имеет следующий вид:

$$f_f = \left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{R}\right)^2, \quad \sigma_1 \geq 0,$$

где  $f_f$  – индекс разрушения волокна,  $X_t$  – предел прочности в продольном направлении при растяжении,  $S, R$  – предельные сдвиговые напряжения в плоскостях с нормальными в направлениях 3 и 2 соответственно.

Функция критерия прочности при сжатии в направлении волокон:

$$f_f = \frac{\sigma_1}{X_c}, \quad \sigma_1 < 0,$$

где  $X_c$  – предел прочности в продольном направлении при сжатии.

Функция критерия прочности матрицы при растяжении в поперечном направлении имеет следующий вид:

$$f_m = \left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{R}\right)^2, \quad \sigma_2 \geq 0,$$

где  $f_m$  – индекс разрушения матрицы,  $Y_t$  – предел прочности в поперечном направлении при растяжении,  $S, R, Q$  – предельные сдвиговые напряжения в плоскостях с

нормальными в направлениях 3, 2, 1 соответственно.

Более сложные выражения используются, когда поперечное напряжение является сжимающим:

$$f_m = \left(\frac{\sigma_2}{2Q}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{R}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2Q}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2}{Y_c}, \quad \sigma_2 < 0,$$

где  $Y_c$  – предел прочности в поперечном направлении при сжатии.

Расслоение при растяжении или сжатии описывается с помощью следующего выражения:

$$f_d = \left( \frac{\sigma_3}{Z} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{13}}{R} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{23}}{Q} \right)^2,$$

где  $Z$  - предел прочности в перпендикулярном направлении.

Считается, что разрушение происходит, когда один из частных критериев прочности достигает единицы. Поэтому функция критерия прочности *Hashin* записывается в следующем виде:

$$f = \max(f_f, f_m, f_d)$$

Материал монослоя имеет следующие прочностные характеристики:  $X_t = 2630$  МПа,  $X_c = 1530$  МПа,  $Y_t = 86$  МПа,  $Y_c = 213$  МПа,  $S = 112$  МПа. Упругие характеристики имеют следующие

значения:  $E_{11} = 147$  ГПа,  $E_{-11} = 133$  ГПа,  $E_{22} = 7,41$  ГПа,  $E_{-22} = 8,5$  ГПа,  $G = 3,39$  ГПа,  $\mu = 0,32$ . Здесь  $E_{11}$  - модуль упругости в продольном направлении,  $E_{22}$  - модуль упругости в поперечном направлении,  $G$  - модуль упругости при сдвиге,  $\mu$  – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в продольном направлении.

Характеристики монослоя получены производителем 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, содержание влаги в которых не превышает 10 % от максимального влагонасыщения при относительной влажности 85 %.

### Результаты расчёта

На рис. 4 показано распределение нормальных напряжений в продольном

направлении для слоя № 4 ( $0^\circ$ ) при действии статической нагрузки.

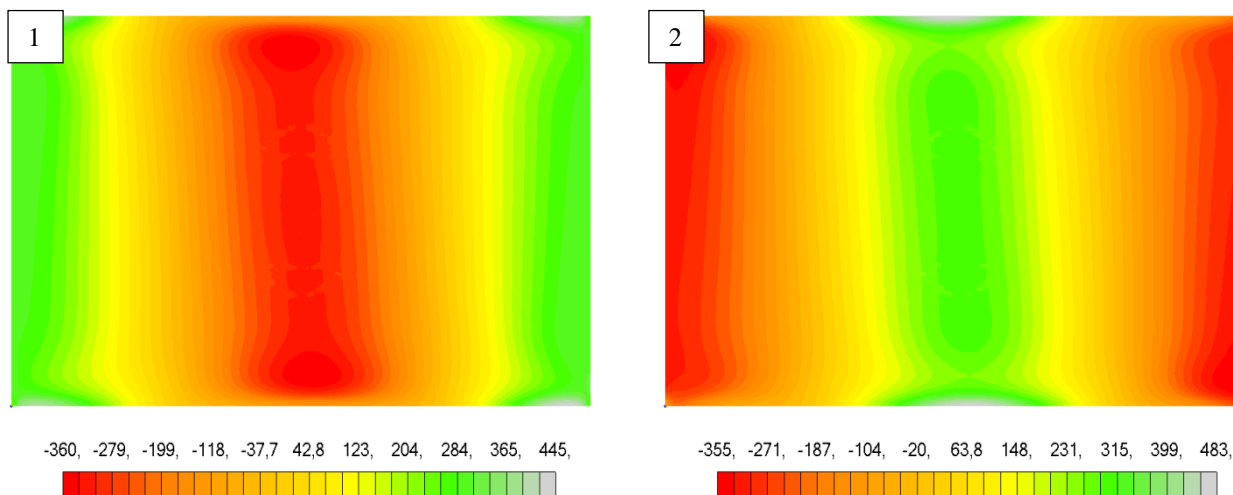


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений в продольном направлении, МПа:  
1 – пластина с дефектами, 2 – пластина без дефектов

На рис. 5 показано распределение напряжений сдвига для слоя №4 ( $0^\circ$ ) при действии статической нагрузки.

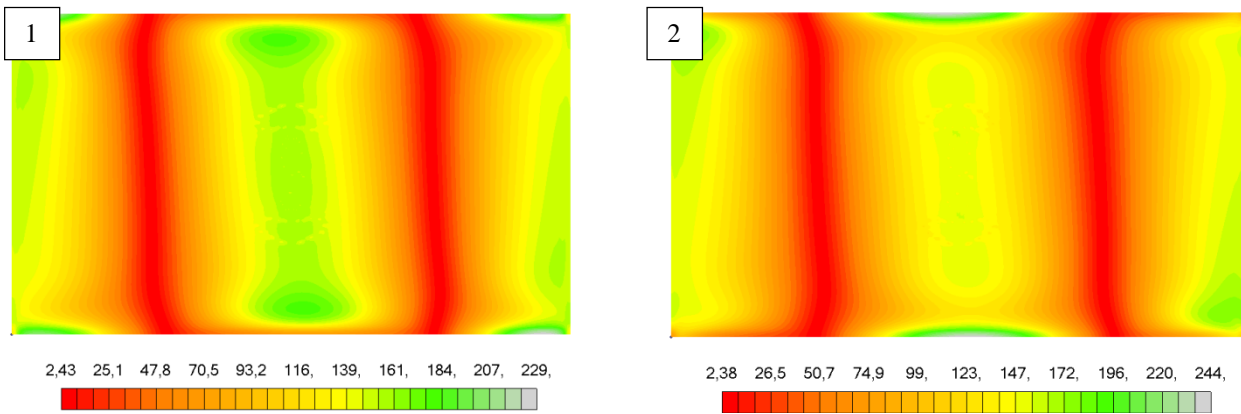


Рис. 5. Распределение напряжений сдвига, Мпа:  
1 – пластина с дефектами, 2 – пластина без дефектов

На рис. 6 показано распределение нормальных напряжений в продольном направлении для слоя № 4 (0°) при дей-

ствии нестационарной динамической нагрузки в момент времени 0,69 мс.

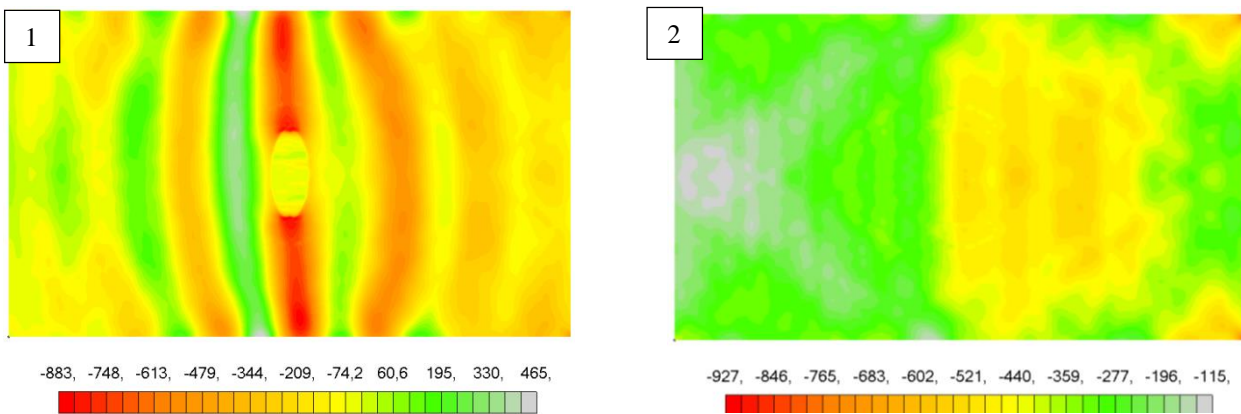


Рис. 6. Распределение нормальных напряжений в продольном направлении, Мпа:  
1 – пластина с дефектами, 2 – пластина без дефектов

На рис. 7 показано распределение напряжений сдвига для слоя №4 (0°) при

действии нестационарной нагрузки в момент времени 0,69 мс.

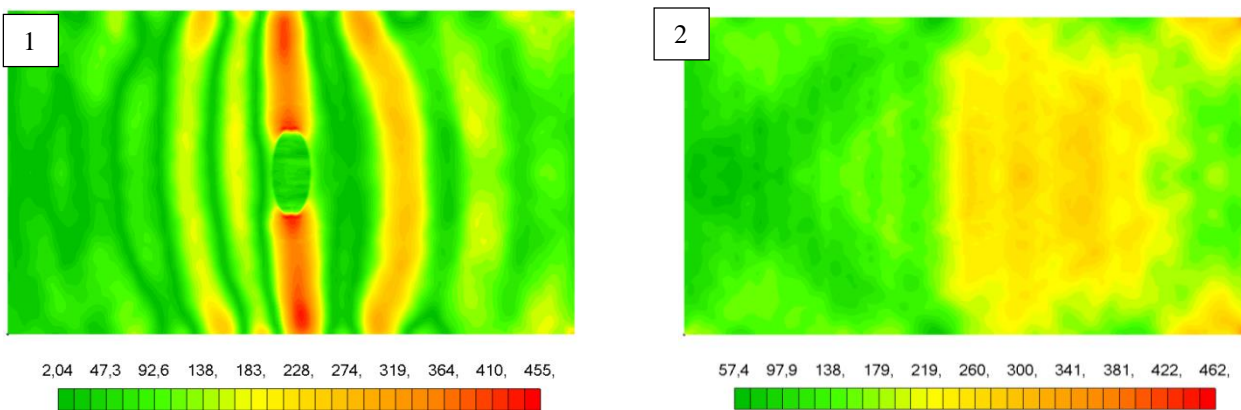


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений сдвига, Мпа:  
1 – пластина с дефектами, 2 – пластина без дефектов

На рис. 8, 9 показано распределение индексов разрушения в пластине при

наличии и отсутствии дефектов при действии статической нагрузки.



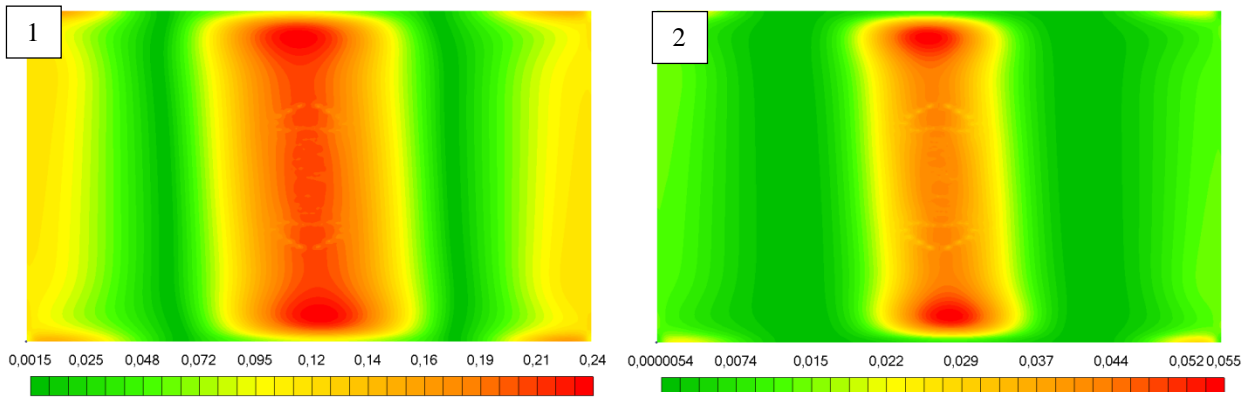


Рис. 8. Распределение индексов разрушения в пластине с дефектами:  
1 – Puck, 2 – Hashin

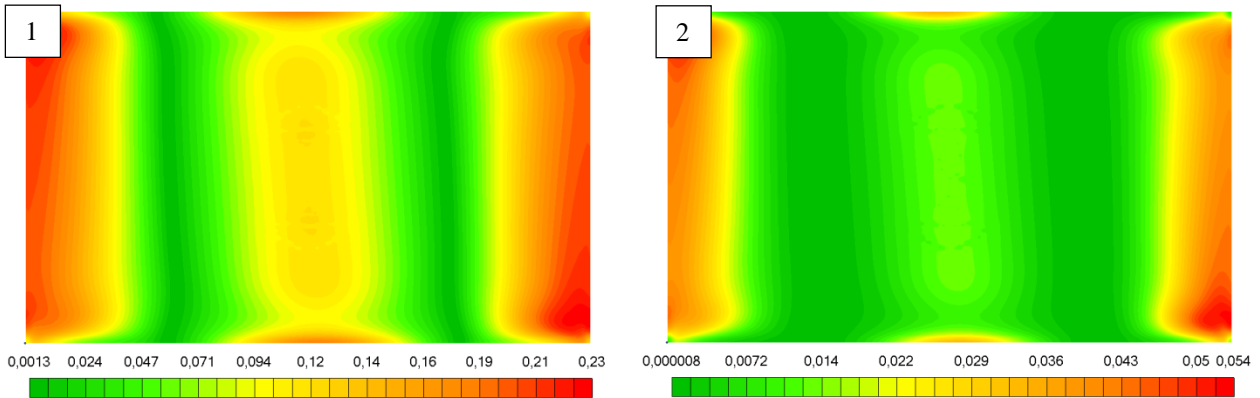


Рис. 9. Распределение индексов разрушения в пластине без дефектов:  
1 – Puck, 2 – Hashin

На рис. 10, 11 показано распределение индексов разрушения в пластине при наличии и отсутствии дефектов при дей-

ствии нестационарной нагрузки в момент времени 0,69 мс.

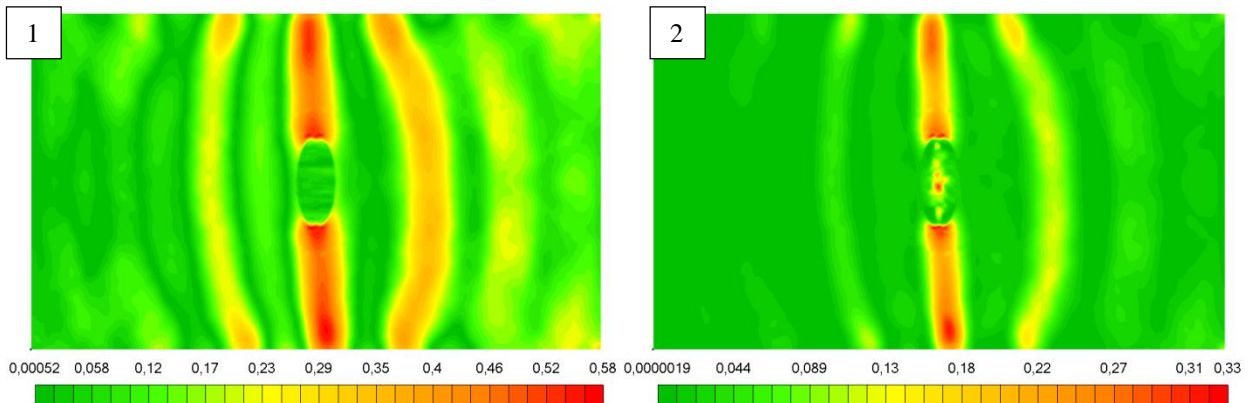


Рис. 10. Распределение индексов разрушения в пластине с дефектами:  
1 – Puck, 2 – Hashin

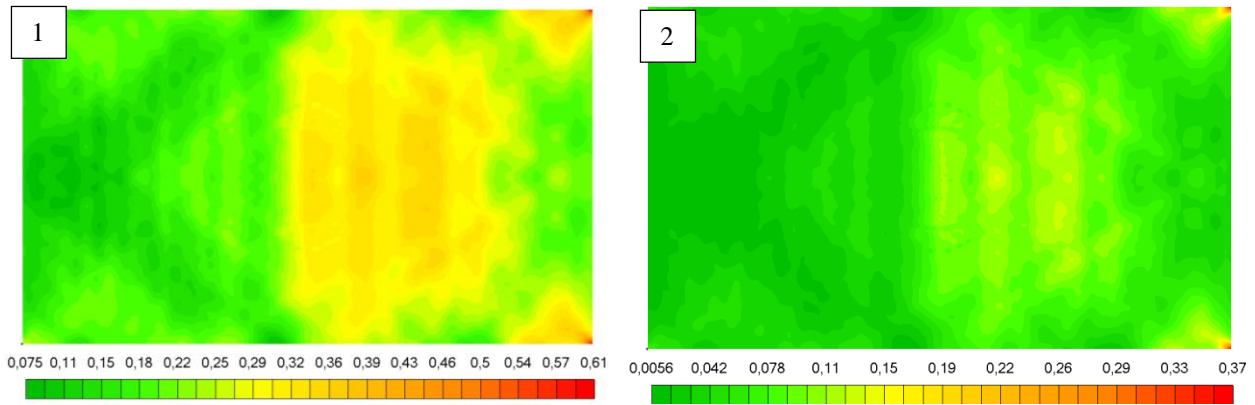


Рис. 11. Распределение индексов разрушения в пластине без дефектов:  
1 – Puck, 2 – Hashin

На рис. 12, 13 показано распределение коэффициентов запаса в пластине при

наличии и отсутствии дефектов при действии статической нагрузки.

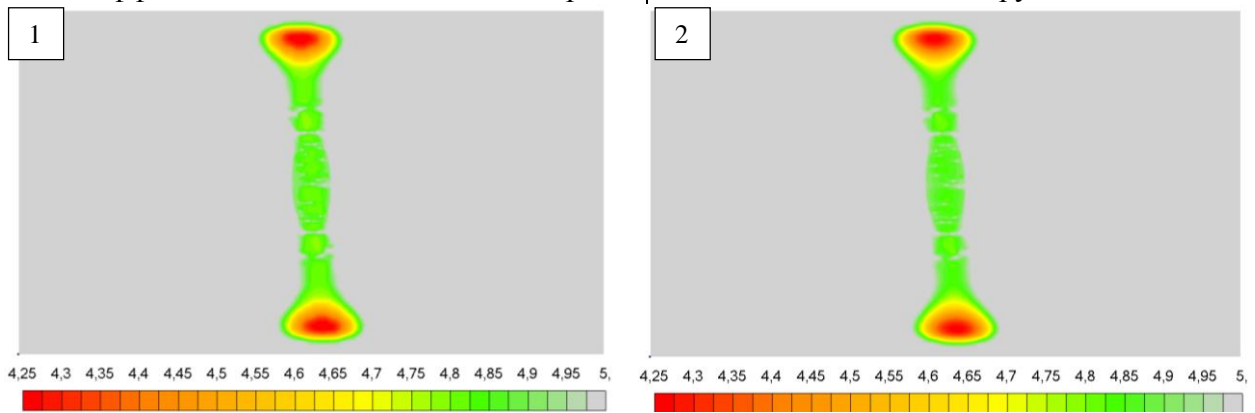


Рис. 12. Распределение коэффициентов запаса в пластине с дефектами:  
1 – Puck, 2 – Hashin

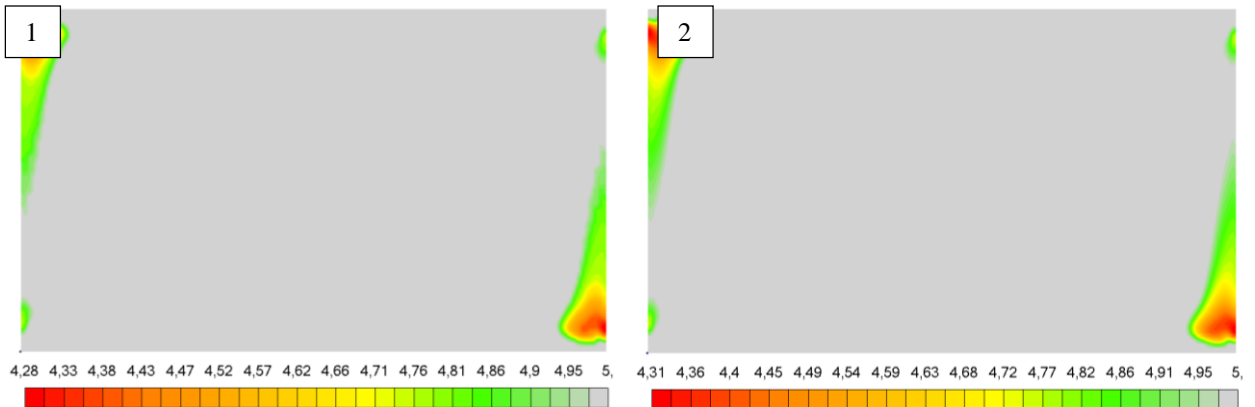


Рис. 13. Распределение коэффициентов запаса в пластине без дефектов:  
1 – Puck, 2 – Hashin

На рис. 14, 15 показано распределение коэффициентов запаса в пластине при наличии и отсутствии дефектов при дей-

ствии нестационарной нагрузки в момент времени 0,69 мс.



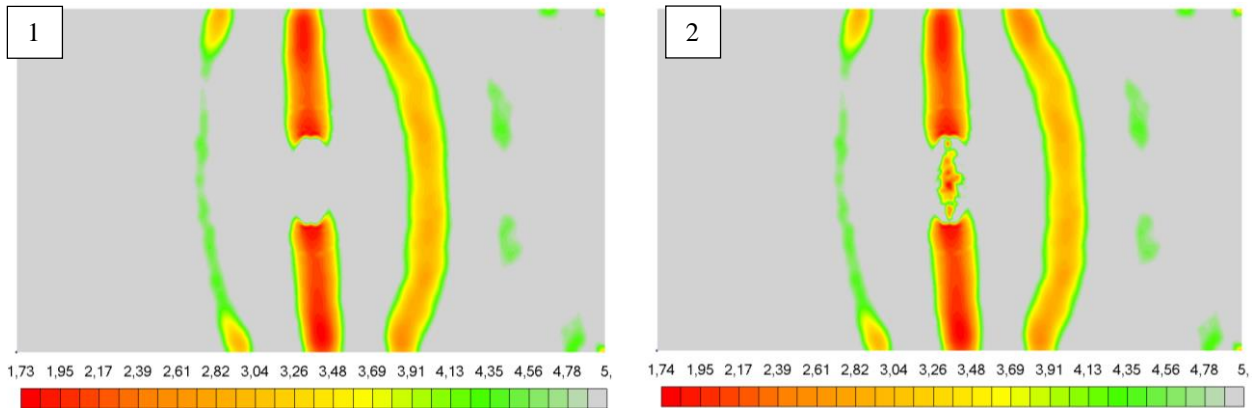


Рис. 14. Распределение коэффициентов запаса в пластине с дефектами:  
1 – Puck, 2 – Hashin

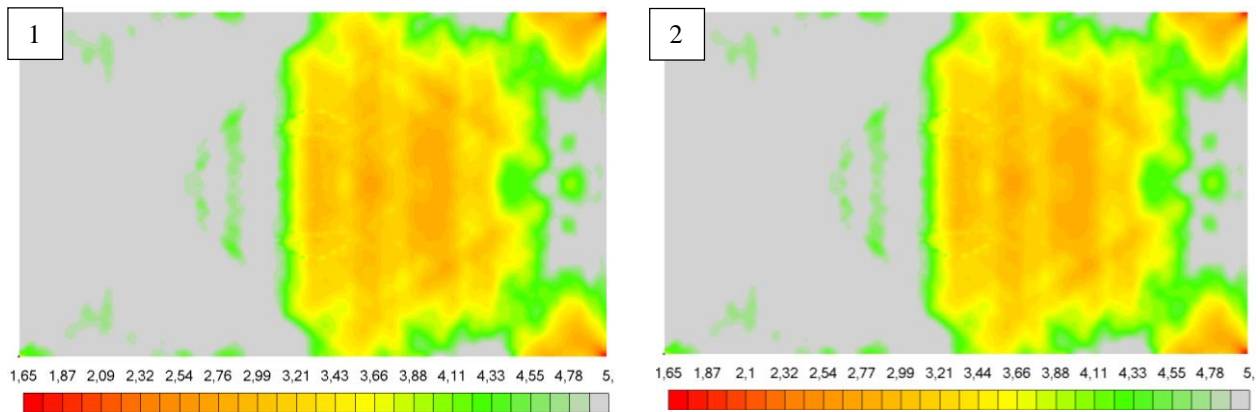


Рис. 15. Распределение коэффициентов запаса в пластине без дефектов:  
1 – Puck, 2 – Hashin

На рис. 16 показано изменение вертикальных перемещений в повреждённой и

в неповреждённой пластине при действии статической нагрузки.

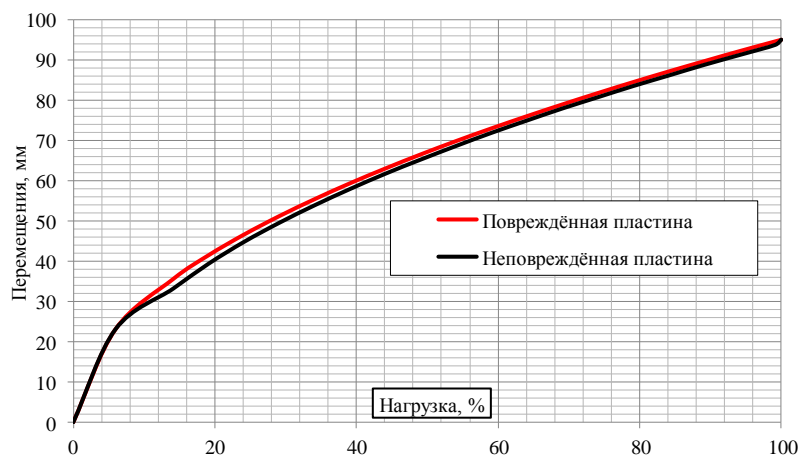


Рис. 16. Изменение вертикальных перемещений в случае действия статической нагрузки

На рис. 17 показано изменение вертикальных перемещений в слоях с дефектами, а также в неповреждённой пластине

при действии нестационарной динамической нагрузки.

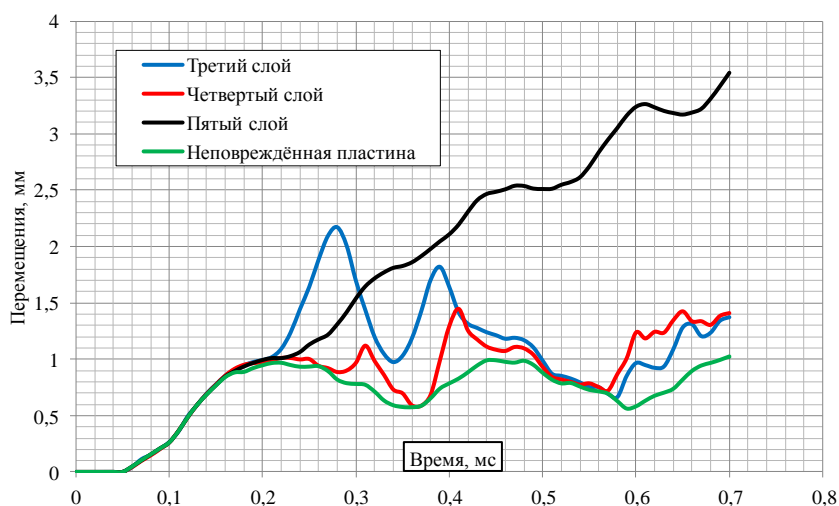


Рис. 17. Изменение вертикальных перемещений в случае действия динамической нагрузки

Из рис. 4 следует, что нормальные напряжения вдоль волокна в случае действия статической нагрузки (в области дефектов) в случае повреждённой пластины в слое № 4 ( $0^\circ$ ) больше на  $\approx 1\%$ , чем в случае неповреждённой пластины.

Из рис. 6 следует, что нормальные напряжения вдоль волокна в случае действия динамической нагрузки в момент времени 0,69 мс в области дефектов в случае повреждённой пластины в слое № 4 ( $0^\circ$ ) больше на 75%, чем в случае неповреждённой.

Максимальное значение индекса разрушения при действии статической

нагрузки достигается при использовании критерия разрушения *Puck* – 0,24, минимальное значение по критерию *Hashin* – 0,055, при действии динамической нагрузки максимальное значение индекса разрушения достигается при использовании критерия разрушения *Puck* – 0,58, минимальное значение по критерию *Hashin* – 0,33.

Из рис. 17 видно, что максимальный прогиб в случае действия динамической нагрузки в центре повреждённой пластины больше на  $\approx 71\%$ , чем прогиб в центре неповреждённой пластины.

## Заключение

Анализ результатов показал, что:

1. Влияние внутренних дефектов типа расслоений заданной формы, размеров, количества и мест расположения применительно к рассматриваемой пластине при действии статической сжимающей нагрузки практически не сказывается, о чем свидетельствует распределение полей напряжений и изменение прогибов в центре пластины.

2. В случае действия динамической сжимающей нагрузки наблюдается заметное отличие характера и величины прогибов в различные моменты времени для случая наличия и отсутствия дефектов между слоями, а также отличие в распределении и максимальном значении действующих продольных напряжений.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведский, А.Л. Динамика подкреплённой композитной панели со смешанной укладкой монослоёв с внутренними дефектами при нестационарных воздействиях / А.Л. Медведский, М.И. Мартиросов, А.В. Хомченко // Вестник Брянского государственного университета. - 2019. - № 7. - С. 35-41.
  2. Медведский, А.Л. Разрушение плоской композитной панели с множественными межслоевыми дефектами под действием нестационарной нагрузки / А.Л. Медведский, М.И. Мартиросов, А.В. Хомченко: материалы Междунар. симпозиума «Перспективные материалы и технологии». - Витебск. – ВГТУ, 2019. - С. 23-25.
  3. Медведский, А.Л. Численный анализ поведения слоистой композитной панели с межслоевыми дефектами под действием динамических нагрузок / А.Л. Медведский, М.И. Мартиросов, А.В. Хомченко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - Т. 15. - №2. - 2019. - С. 127-134.
  4. Карташова, Е.Д. Построение поверхности разрушения полимерных слоистых композиционных материалов / Е.Д. Карташова, А.А. Желудкова, Д.Н. Абаренчева, А.Ю. Муйземнек: сб. статей V Всерос. науч.-техн. конф. для молодых учёных и студентов с междунар. участием. - 2019. - С. 143-148.
  5. Hashin, Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites / Z. Hashin // Journal of Applied Mechanics. - 1980. - Vol. 47. - P. 329-334.
  6. 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.
  7. 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.
  8. 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.
- 
1. Medvedsky, A.L. Dynamics of stiffened composite panel with mixed laying of mono-layers with inner defects at transient impacts / A.L. Medvedsky, M.I. M.I. Martirosov, A.V. Khomchenko // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2019. – No.7. – pp. 35-41.
  2. Medvedsky, A.L. Destruction of flat composite panel with multiple interlaminar defects under action of transient load / A.L. Medvedsky, M.I. Martirosov, A.V. Khomchenko: *Proceedings of the Inter. Symposium "Promising Materials and Technologies"*. – Vitebsk. – VSTU, 2019. – pp. 23-25.
  3. Medvedsky, A.L. Numerical analysis of behavior of laminated composite panel with interlaminar defects under action of dynamic loads / A.L. Medvedsky, M.I. Martirosov, A.V. Khomchenko // *Structural Mechanics of Engineering Structures and Installations*. – Vol. 15. – No.2. – pp. 127-134.
  4. Kartashova, E.D. Formation of destruction surface of polymeric laminated composites / E.D. Kartashova, A.A. Zheludkova, D.N. Abarencheva, A.Yu. Muizemnek: *Proceedings of the V-th All-Russian Scientific-Tech. Conf. for Young Scientists and Students with Inter. Participation*. – 2019. – pp. 143-148.
  5. Hashin, Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites / Z. Hashin // Journal of Applied Mechanics. - 1980. - Vol. 47. - P. 329-334.
  6. 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.
  7. 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.
  8. 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.

Ссылка для цитирования:

Медведский, А.Л. Влияние межслоевых дефектов эллиптической формы на поведение прямоугольной пластины из углепластика при действии статической и динамической нагрузок / А.Л. Медведский, М.И. Мартиросов, А.В. Хомченко, Д.В. Дедова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 12. – С. 19-30. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-12-19-30.

Статья поступила в редакцию 30.07.20.  
 Рецензент: д.т. н., профессор Института материаловедения  
 Хабаровского научного центра  
 Дальневосточного отделения  
 Химухин С.Н.,  
 член редсовета журнала «Вестник БГТУ».  
 Статья принята к публикации 30.11.20.

**Сведения об авторах:**

**Медведский Александр Леонидович**, д. физ.-мат. н., зам. генерального директора ФГУП «ЦАГИ», e-mail: mdv66@mail.ru.

**Мартirosов Михаил Иванович**, к.т.н., доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), e-mail: michaelmartirosov@yandex.ru.

**Medvedsky Alexander Leonidovich**, Dr. Sc. Phys.-Math., Deputy-Director General, FSUP "CAGI", e-mail: mdv66@mail.ru.

**Martirosov Michael Ivanovich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Moscow Aircraft Institute (National Research University), e-mail: michaelmartirosov@yandex.ru.

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

**Дедова Дарина Викторовна**, магистрант кафедры «Сопротивление материалов, динамика и прочности машин» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), e-mail: darina.dedova98@gmail.com.

**Khomchenko Anton Vasilievich**, Design Engineer of the I category, PPC "Irkut" Corporations, e-mail: KhomchenkoAnton@yandex.ru.

**Dedova Darina Victorovna**, Master student of the Dep. "Resistance of Materials, Dynamics and Machinery Strength", Moscow Aircraft Institute (National Research University), e-mail: darina.dedova98@gmail.com.