

РАЗРУШЕНИЕ ПЛОСКОЙ КОМПОЗИТНОЙ ПАНЕЛИ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ МЕЖСЛОЕВЫМИ ДЕФЕКТАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНОЙ НАГРУЗКИ

Медведский А.Л.¹, Мартиросов М.И.², Хомченко А.В.³

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет)

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

³ ПАО «Корпорация «Иркут», г. Москва, Россия, khomchenkoanton@yandex.ru

Отличием полимерных композиционных материалов (ПКМ) от металлических материалов являются их пониженные пластические свойства и, следовательно, повышенная чувствительность к динамическим нагрузкам ударного характера. В результате эксплуатации и внешних воздействий в композитных пакетах могут возникать дефекты (под дефектом будем понимать каждое отдельное несоответствие изделия установленным требованиям), которые сопровождаются растрескиванием матрицы, разрушением волокон и монослоев, что оказывает влияние на прочность и несущую способность элементов конструкций из ПКМ.

ПКМ широко используются в современном авиастроении благодаря исключительному сочетанию конструкционных и специальных, в том числе физических, свойств. Дефекты у ПКМ могут иметь различную природу. Классическими дефектами являются: непроклеи (нарушение адгезионной связи между монослоями после автоклавного формования) или расслоение (нарушение адгезионной связи между монослоями, вызванное ударными механическими воздействиями или внутренними напряжениями в изделии после формования или проведения сборочных работ). Такие дефекты относятся к внутренним, так как охватывают внутренние слои композитного пакета.

1. Постановка задачи

Рассматривается плоская прямоугольная панель длиной $a = 532$ мм и шириной $b = 282$ мм (рис. 1).

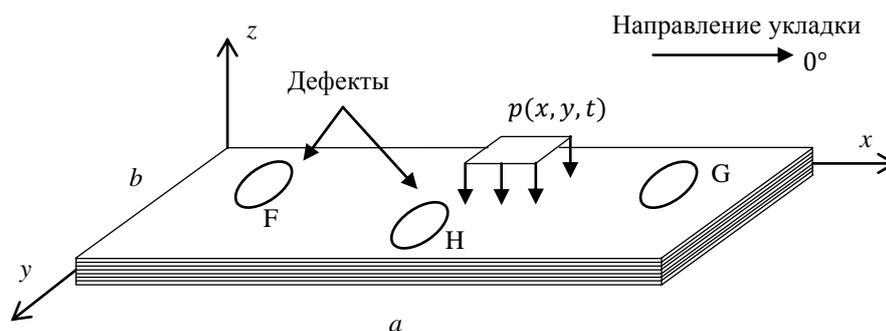


Рисунок 1 - Прямоугольная многослойная панель с дефектами

Панель представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из 12 монослоев, каждый из которых изготовлен из однородного упругого ортотропного материала. Укладка монослоев панели имеет вид: $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$. Предполагается, что в панели присутствуют множественные межслоевые дефекты эллиптической формы (рис. 2). Дефекты расположены по толщине в произвольном порядке. 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) производства фирмы Hexcel Composites (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 каландров 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.

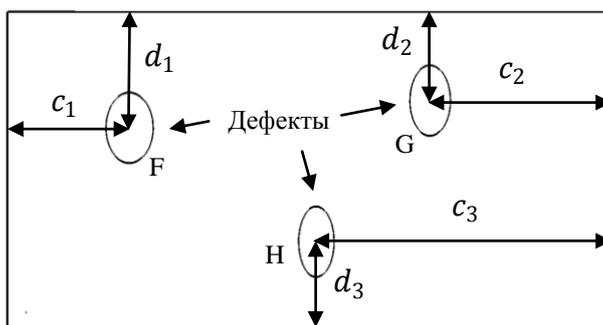


Рисунок 2 - Расположение дефектов в плоскости панели

Толщина монослоя h равна 0,19 мм. Жёсткостные характеристики монослоя: $E_1 = 175 \text{ ГПа}$, $E_2 = 8,5 \text{ ГПа}$, $G = 3,2 \text{ ГПа}$, $\mu_{12} = 0,32$, $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$, где E_1 – модуль упругости в направлении оси x , E_2 – модуль упругости в направлении оси y , μ_{12} – коэффициент Пуассона, G – модуль упругости при сдвиге в плоскости листа, ρ – плотность. Расположение межслоевых дефектов указано на рис. 2, положения центров расслоений: $d_1 = 102 \text{ мм}$, $c_1 = 107 \text{ мм}$, $d_2 = 78,5 \text{ мм}$, $c_2 = 161 \text{ мм}$, $d_3 = 78,5 \text{ мм}$, $c_3 = 261 \text{ мм}$, дефекты имеют форму эллипса с соотношением осей $F = 1,5$, $G = 1,75$, $H = 2,0$ соответственно. Граничные условия на контуре панели соответствуют жёсткому заземлению. Задача решается численно методом конечных элементов (МКЭ).

2. Панель под действием нестационарной нагрузки

В качестве внешней нагрузки рассматривается поле нестационарного давления, которое изменяется по закону: $p(t) = p_0 H(t)$, где $H(t)$ – функция Хэвисайда.

Материал монослоя имеет следующие прочностные характеристики: $X_T = 3042 \text{ МПа}$, $X_C = 1246 \text{ МПа}$, $Y_T = 63 \text{ МПа}$, $Y_C = 217 \text{ МПа}$, $S_{12} = 96 \text{ МПа}$, 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.

Решение получено с помощью программного комплекса LS-DYNA (разработчик Livermore Software Technology Corporation) с применением явной схемы интегрирования полной системы уравнений МКЭ. Слои панели моделируется с помощью элементов со свойствами типа Composite и соединены между собой клеевым контактом, что гарантирует равенство прогибов и углов поворотов, также в модели учитывается контакт в зоне расслоения.

Определяется распределение индексов разрушения f (разрушение наступает при $f=1$) в каждый момент времени [1-3]. Рассматриваются следующие критерии разрушения: maximum stress, maximum strain, Hill, Tsai-Wu, Tsai-Hill (Hill-Mises), Hankinson, Cowin, Hoffman, Puppo-Evensen, Norris, Fischer, Norris-McKinnon, DeAlia, Grant-Sanders, Puck, Hashin, Chang-Chang в случае действия давления $p_0 = 1,25 \text{ МПа}$. Проводится сравнение результатов, полученным по различным критериям разрушения.

В качестве примера, на рис. 3 представлено поле распределения индекса разрушения в слое №10 (90°) в момент времени 0,4 мс с использованием критерия Puck.

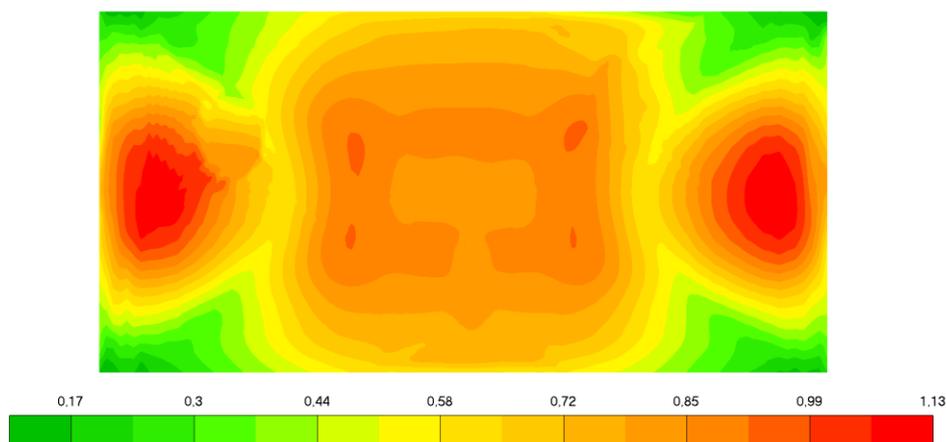


Рисунок 3 - Распределение индекса разрушения для критерия Pusk

3. Заключение

Предложенная методика численного моделирования поведения плоских композитных панелей с учётом произвольно расположенных множественных межслоевых дефектов под действием нестационарных нагрузок может быть использована при проектировании элементов конструкций из ПКМ в различных отраслях машиностроения.

Литература

1. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Напряженно-деформированное состояние многослойной композитной пластины при наличии межслоевых дефектов // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2018. - Вып. 8. - С. 168–179.
2. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Сравнительный анализ критериев разрушения многослойной композитной пластины при наличии межслоевых дефектов // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2018. - Вып. 9. - С. 399–409.
3. Медведский А.Л., Мартиросов 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.