

## ДИНАМИКА ПОДКРЕПЛЁННЫХ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ МЕЖСЛОЕВЫМИ ДЕФЕКТАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗОК

А. Л. МЕДВЕДСКИЙ

*Центральный аэрогидродинамический институт  
им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский, Российская Федерация*

М. И. МАРТИРОСОВ

*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

А. В. ХОМЧЕНКО

*ПАО «Корпорация «Иркут», г. Москва, Российская Федерация*

Обеспечение необходимого уровня прочности элементов силовых конструкций является важнейшей задачей при рассмотрении вопросов безопасности транспортного машиностроения.

В различных областях промышленности, в частности в авиационной, широко применяются новые виды материалов, которые постоянно совершенствуются, выполняя повышающиеся требования отрасли. К числу самых распространённых материалов следует отнести полимерные композиционные материалы (ПКМ), обладающие рядом преимуществ (высокая удельная прочность, жёсткость, сопротивляемость усталости и т.д.) и возможностью создания уникальных свойств за счёт высокой степени вариативности форматов укладок и физико-механических свойств монослоёв, что в конечном итоге позволяет учитывать особенности работы того или иного элемента конструкции и оптимально распределять материал. Однако при всех преимуществах ПКМ имеется ряд недостатков, связанных с низкой сопротивляемостью ударным воздействиям и чувствительностью к межслоевым дефектам (под дефектом будем понимать каждое отдельное несоответствие изделия установленным требованиям).

Дефекты и повреждения могут приводить к значительному снижению прочностных характеристик элементов конструкций из ПКМ, которые, как правило, сопровождаются растрескиванием матрицы, нарушением целостности волокон и монослоёв. Указанные ранее дефекты и повреждения могут возникать как на этапе производства при нарушении технологии, так и на этапе эксплуатации (столкновение с птицей, удар камнями на взлёте, нелокализованный разлёт роторов двигателя, разлёт пневматики, удары молний и разряды статического электричества, попадание града, столкновение с аэродромной инфраструктурой на этапах буксировки или руления, удар аэродромным устройством на стоянке, падение инструмента или заменяемой детали и т.д.). Особый интерес представляет исследование поведения элементов конструкций из ПКМ с дефектами (повреждениями) при воздействии нестационарных нагрузок (поля давления различной природы). Уровень безопасности авиаконструкций, созданных на основе внедрения новых материалов (например, ПКМ), должен быть не ниже уровня безопасности существующих авиаконструкций, изготовленных из традиционных материалов по традиционным технологиям.

В рамках данной работы рассматриваются:

1) пологая цилиндрическая трёхстрингерная панель из ПКМ длиной  $a = 340$  мм, шириной  $b = 140$  мм, стрелой подъёма  $c = 4,9$  мм. Стрингеры имеют тавровое сечение с высотой стенки 12 мм и шириной основания 24 мм, толщина 2,28 мм. Укладка монослоёв обшивки имеет следующий формат:  $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$ . Рассматривается два вида расположения эллиптических повреждений: в «подстрингерной» зоне в центральном сечении с осями 34 и 24 мм и находящимися между слоями 2-3, 3-4, 4-5, 8-9, 9-10, 10-11, в «межстрингерной» зоне в центральном сечении между всеми слоями и осями 19,91 и 12 мм. В качестве нагрузки на панель с повреждениями в «межстрингерной» зоне рассматривается равномерно распределённое поле давления, которое изменяется по закону  $p(t) = p_0 H(t)$ , где  $H(t)$  – функция Хэвисайда,  $p_0 = 1,5$  МПа. На внешнюю поверхность панели с расположением повреждений в «подстрингерной» зоне действует поле давления, распределённое по закону:

$$p(\varphi, t) = -p_0 \cos^2 \varphi H(t) H\left(\frac{\pi}{2} - |\varphi|\right), \text{ где } \varphi - \text{угловая координата, } p_0 = 1,0 \text{ МПа;}$$

2) пологая цилиндрическая четырёхстрингерная панель длиной  $a = 750$  мм, шириной  $b = 490$  мм, стрелой подъёма  $c = 7,38$  мм. Предполагается, что между всеми слоями обшивки панели в центральном сечении между стрингерами расположены повреждения эллиптической формы

с осями  $d = 36$  мм,  $e = 26$  мм. Обшивка панели имеет следующий формат укладки:  $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$ . Стрингер представляет собой единую деталь, состоящую из двух половинок  $L$ -образного сечения, выполненных из ПКМ.

В процессе формования цельной конструкции в местах стыковки стрингера и обшивки прокладывается технологический элемент – жгут. В рамках данной работы вопросы прочности межслоевого соединения половинок стрингеров, а также мест соединения со жгутом и обшивкой не рассматриваются. Формат укладки стрингера:  $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$ .

В качестве внешней нагрузки рассматривается нестационарное воздействие взрывного характера с энергией взрыва  $E = 209,2$  кДж. Эпицентр взрыва расположен на расстоянии 500 мм от внешней поверхности панели. Взрывная волна имеет сферическую форму. В качестве граничных условий в обоих случаях используется шарнирное опирание вдоль длинных кромок.

Обе рассматриваемые в работе панели изготовлены из углепластика на основе препрега HexPly M21/34%/UD194/IMA (углеродная лента IMA на основе высокопрочного волокна HexTow IMA-12K и эпоксидное модифицированное связующее M21) производства фирмы Hexcel Composites (США), технология изготовления – автоклавная. Толщина монослоя:  $h = 0,184$  мм.

Предполагается, что известны следующие физико-механические характеристики монослоя: модуль упругости в продольном направлении, модуль упругости в поперечном направлении, коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в продольном направлении, модуль упругости при сдвиге в плоскости листа, плотность. Приведенные механические характеристики соответствуют режиму испытаний RTD (Root Temperature Dry) – испытания композитов при комнатной температуре  $+23$  °С и влажности в состоянии поставки (состояние, в котором находятся образцы сразу после изготовления, содержание влаги в них не превышает 10 % от максимального влагонасыщения при относительной влажности 85 %). Все исходные данные получены от производителя и являются паспортными.

Задача решается с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе LS-DYNA (Lawrence Livermore National Laboratory). Для обеспечения равенства прогибов и углов поворота слоёв обшивки и стрингеров используется клеевой контакт «AUTOMATIC\_ONE\_WAY\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK», в местах расположения повреждений присутствует односторонний контакт, который учитывает взаимодействие между зонами расслоений: «AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE». Формулировка конечных элементов: «Belytschko-Tsay». Для решения используется явная схема интегрирования полной системы уравнений.

В результате решения определяются: поле давления, действующее на внешнюю поверхность панели в случае взрывного воздействия, поля перемещений и действующих напряжений в слоях. На основе напряжённого состояния определяется распределение индекса разрушения  $f$  (разрушение монослоя наступает при  $f = 1$ ) по следующим критериям разрушения, позволяющим отдельно оценивать прочность матрицы и волокна: Hashin, Chang-Chang, Puck, LaRC03. На основе распределения индексов разрушения определяются коэффициенты запаса прочности в различные моменты времени.

Проводится сравнение напряжённого состояния и распределения индексов разрушения и коэффициентов запаса прочности для различных расположений повреждений (в зонах между стрингерами и под стрингером) и в случаях отсутствия повреждений между слоями. Проводится сравнительный анализ количественного и качественного распределения индексов разрушения по вышеуказанным критериям разрушения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-08-01153 А).

УДК 624.131.3

## ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ ГРУНТОВЫХ СРЕД В НЕОРТОГОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

*В. Ф. МЕЙШ*

*Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев*

*Ю. А. МЕЙШ*

*Национальный транспортный университет, г. Киев, Украина*

Рассматривается задача динамики грунтовых сред в неортогональной системе координат. Согласно [3], уравнения движения среды в произвольной системе координат в физических величинах имеют вид