

ваться изделия, входящие в перечень основных силовых элементов (ОСЭ). ОСЭ – элементы основной силовой конструкции, которые воспринимают значительную долю полётных, наземных нагрузок и нагрузок от избыточного давления, разрушение которых может привести к аварийной или катастрофической ситуации. Так, например, в гражданской авиации из этого препрега могут производиться следующие детали: панели, лонжероны и нервюры центроплана; панели, лонжероны и нервюры консоли крыла; обшивки, лонжероны и нервюры стабилизатора и киля; балки пола и т. д.

Физико-механические характеристики монослоя известны. Эти характеристики являются паспортными и получены производителем препрега экспериментально по европейским стандартам EN и американским стандартам ASTM для режима RTD (Room Temperature Dry): нормальная температура $+23\pm 3$ °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 %).

Пластина моделируется объёмными элементами типа Solid Laminate в программном комплексе Simcenter Femap, затем модель импортируется в программный комплекс конечно-элементного анализа LS-DYNA (Lawrence Livermore National Laboratory), где задаются свойства материала, нагрузки и граничные условия. Все слои жёстко сцеплены клеевым контактом за исключением областей с дефектами, в которых учитывается контактное взаимодействие. Граничные условия соответствуют жёсткому заземлению по всем сторонам пластины или шарнирному опиранию ее длинных сторон при свободных коротких. Используется явная схема интегрирования полной системы уравнений метода конечных элементов (МКЭ).

Определяется поле напряжений и деформаций в каждом слое пластины. На основе полей напряжений вычисляются индексы разрушения монослоя (разрушение наступает, когда этот индекс становится равным 1) в различные моменты времени при наличии и отсутствии дефектов при действии статической и динамической нагрузок. Рассматриваются следующие критерии разрушения для ПКМ: Puck, Hashin, Chang-Chang, LaRC (Langley Research Center). Данные критерии дают возможность оценивать прочность матрицы и волокна отдельно, что позволяет получить более полную картину об остаточной прочности многослойного КП. Проводится сравнение результатов, полученных по этим критериям.

Аналогичные расчёты проведены и для однонаправленного углепластика на основе препрега HexPly 8552/34%/UD134/AS4-12K (углеродная лента AS4 на основе углеродного волокна HexTow AS4-12K и эпоксидное модифицированное связующее 8552). В гражданской авиации из данного препрега могут изготавливаться средне- и слабонагруженные детали конструкционного назначения по автоклавной технологии: элементы механизации крыла и хвостового оперения; обтекатели закрылков; створки шасси; крышки люков центроплана и консоли крыла; обтекатели пилонов навески двигателя. Производитель препрега тот же – фирма Hexcel Composites (США).

Предложенная методика численного моделирования (с применением МКЭ) напряженно-деформированного состояния композитных пластин с учётом произвольно расположенных множественных межслоевых дефектов различной формы и размеров под действием статических и динамических нагрузок может быть использована при проектировании элементов конструкции из ПКМ для современной АТ.

УДК 539.3

ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С ОТКЛОНЕНИЯМИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А. Л. МЕДВЕДСКИЙ

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

М. И. МАРТИРОСОВ, А. В. ХОМЧЕНКО

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Повышенные требования к новым образцам техники в различных областях машиностроения приводят к необходимости использования современных конструкционных материалов, которые по своим характеристикам должны превосходить традиционные металлические материалы. Использо-

вание полимерных композиционных материалов (ПКМ) при создании элементов конструкций получило широкое распространение. При всех преимуществах изделия из ПКМ чувствительны к внутренним повреждениям, которые могут появляться на различных этапах производства и эксплуатации. Под повреждением будем понимать отклонение элемента конструкции от нормы при сохранении его работоспособности. Механика разрушения ПКМ достаточно сложна в силу анизотропии свойств монослоев, взаимного влияния напряжённо-деформированного состояния монослоев друг на друга, а также ввиду наличия повреждений.

В авиации (в России, США, Европе и др.) выделено пять категорий повреждений изделий из ПКМ в зависимости от требуемого уровня сохранения остаточной прочности, контролепригодности, интервала между осмотрами, условий появления повреждения, а также является или нет очевидным само событие, вызывающее повреждение.

В работе рассматриваются элементы конструкций, выполненные из ПКМ при наличии множественных внутренних повреждений (расслоения эллиптической, круговой, прямоугольной или произвольной формы, расположенные между монослоями один под другим) под действием нестационарных нагрузок различного характера. Элементы конструкций изготовлены из углепластика на основе препрегов HexPly M21/34%/UD194/IMA (углелента) и HexPly M21/40%/285T2/AS4C (углеткань), предназначенных для производства изделий по автоклавной технологии. Физико-механические характеристики монослоя известны и получены производителем препрега экспериментально по существующим стандартам (американским ASTM и европейским EN).

Для изучения поведения элементов конструкций при наличии межслоевых повреждений используется следующий алгоритм:

а) моделирование каждого монослоя композитного пакета (КП) отдельным набором конечных элементов;

б) соединение слоёв элементов с помощью клеяющего контакта (AUTOMA-TIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK), за исключением зон, где располагаются повреждения, в этих зонах учитывается односторонний контакт (AUTOMA-TIC_SURFACE_TO_SURFACE);

в) задание соответствующих свойств материала (054/055_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE), направления укладки, приложения нагрузки и граничных условий к модели;

г) проведение расчёта и получение необходимых результатов.

Решены следующие задачи с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе LS-DYNA (Lawrence Livermore National Laboratory):

1 Пластина прямоугольной формы. Формат укладки пластины: $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$. В качестве нагрузки рассматривается поле давления, равномерно распределённое по поверхности пластины и изменяющееся по закону: $P(t) = p_0 H(t)$, где $p_0 = 1,5$ МПа, $H(t)$ – функция Хэвисайда.

2 Гладкая полая панель (прямоугольная в плане). Формат укладки панели: $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{\text{sym}}$. На панель действует поле давления, распределённое на выпуклой поверхности: $p(\varphi, t) = p_0 \cos^2 \varphi H(t) H(\pi/2 - |\varphi|)$, где $p_0 = 1$ МПа (изменение угловой координаты φ происходит вдоль короткой кромки панели).

3 Пологая панель под действием ударного воздействия. Формат укладки: $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$. В направлении нормали к внешней поверхности нанесён удар жёстким бойком сферической формы в центральном сечении. Скорость удара составляет 12 м/с, масса бойка 15 кг.

4 Подкреплённая полая цилиндрическая панель. Формат укладки: $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{\text{sym}}$. В качестве подкрепляющих элементов используются стрингеры Т-образного сечения. Дефекты располагаются в межстрингерной зоне центрального сечения. В качестве внешней нагрузки рассматривается взрывное воздействие с энергией взрыва $E = 209,2$ кДж и волной сферической формы. Для моделирования взрыва используется функция «LOAD_BLAST_ENHANCED», которая основана на модели Kingery-Bulmash. Эпицентр взрыва располагается на расстоянии 500 мм от внешней поверхности панели.

5 Цилиндрическая гладкая оболочка. Формат укладки: $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{\text{sym}}$. На оболочку действует взрывная волна сферической формы с энергией взрыва $E = 418,4$ кДж. Эпицентр взрыва находится на расстоянии $L_2 = 900$ мм от внешней поверхности оболочки.

6 Цилиндрическая подкреплённая оболочка. Формат укладки оболочки: $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$. Стрингер имеет Т-образное сечение (11x14 мм), поперечное сечение шпангоутов – швеллер (20x6 мм). Предполагается, что между слоями № 1-2, № 2-3 и т. д. до № 11-12 (один под другим) расположены дефекты эллиптической формы с осями 80 и 45 мм.

В качестве нагрузки рассматривается удар абсолютно жёстким бойком полусферической формы с массой 5 кг со скоростями 5 и 8 м/с. Граничные условия – шарнирное опирание по торцам оболочки.

7 Прямоугольная пластина со следующей укладкой $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$. Между слоями № 3 и № 4 КП расположен дефект произвольной формы. Граничные условия – шарнирное опирание кромок пластины. В качестве нагрузки рассматривается воздействие на пластину фрагмента шины из армированной резины основной опоры шасси. Такой фрагмент моделируется прямоугольным параллелепипедом, используется модель материала «077_O-OGDEN_RUBBER» (данная модель позволяет описывать поведение гиперупругих материалов, таких как каучуки, полимеры и биологические ткани) и объёмные конечные элементы гексагональной формы.

Задачи решаются численно с применением явной схемы интегрирования по времени МКЭ.

В результате решения определяются поля перемещений, напряжений и деформаций в слоях элементов конструкций в различные моменты времени. Вычисляются эпюры поля давления, действующего на внешнюю поверхность элементов при взрывном воздействии, графики зависимости давления от времени в характерных точках. Оценивается влияние повреждений на прочность по критериям разрушения для ПКМ: Hashin, Chang-Chang, Puck, LaRC (Langley Research Center). В случае действия ударной нагрузки оценивается влияние повреждений на развитие расслоений между слоями.

Ниже приводится список источников, который использовался при подготовке данной работы.

Список литературы

1 **Медведский, А. Л.** Поведение полой композитной панели с внутренними повреждениями под действием нестационарной нагрузки / А. Л. Медведский, М. И. Мартиросов, А. В. Хомченко // Строительная механика и расчет сооружений / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – М., 2019. – № 2. – С. 43–47.

2 **Медведский, А. Л.** Поведение полой композитной четырехстрингерной панели с внутренними повреждениями при нестационарном воздействии / А. Л. Медведский, М. И. Мартиросов, А. В. Хомченко // Учёные записки ЦАГИ. – 2020. – Т. 51, № 2. – С. 47–56.

УДК 539.3

К ВОПРОСАМ ПОСТАНОВКИ И ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НЕКРУГОВОГО СЕЧЕНИЯ

В. Ф. МЕЙШ

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

Ю. А. МЕЙШ

Национальный транспортный университет, г. Киев, Украина

В. Ф. КОРНИЕНКО

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

Широкое применение оболочечных конструкций в строительстве современных сверхзвуковых/ гиперзвуковых летательных аппаратах и многоразовых космических транспортных системах наблюдается в последние годы и активизируется в настоящее время. Целью данной работы является постановка краевых задач для конических оболочек некругового сечения, их численное решение и численное исследование деформирования при действии нестационарных нагрузок.

Отнесем коническую оболочку некругового сечения к криволинейной ортогональной системе координат α_1, α_2, z . Координатные линии α_1, α_2 принадлежат срединной поверхности оболочки и совпадают с линиями главных кривизн; координатная линия z является прямой, ортогональной к срединной поверхности. Будем считать величину z положительной, если точка находится со стороны выпуклости срединной поверхности.

Выражения для коэффициентов первой квадратичной формы и кривизны срединной поверхности конической оболочки некругового сечения имеют вид

$$A_1 = 1, A_2 = R_s;$$