

Анализ численных различий в результатах расчёта по двум механико-математическим моделям динамического деформирования пластины (с дополнительным инерционным членом $\pm Dm\Delta\dot{w}$ и без него) был выполнен для частот свободных колебаний.

Используя метод Фурье, решение уравнения (2) для любого момента времени t можно представить в виде следующего выражения:

$$w = [A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)] [C_1 J_0(r\gamma^-) + C_2 Y_0(r\gamma^-) + C_3 J_0(r\gamma^+) + C_4 K_0(r\gamma^+)],$$

здесь $J_0(r)$ и $Y_0(r)$ – функции Бесселя нулевого порядка первого и второго рода, соответственно; $I_0(r)$ и $K_0(r)$ – модифицированные функции Бесселя нулевого порядка первого и второго рода; ω – частота свободных колебаний; C_n , A и B – константы интегрирования, определяемые из начальных условий;

$$\gamma^\pm = \sqrt{\sqrt{0,25 \cdot \omega^4 D^2 m^2 + \omega^2 D M_1} \pm 0,5 \cdot \omega^2 D m}.$$

В результате выполненного исследования было установлено, что учёт дополнительного инерционного члена оказывает весомое влияние на результаты расчёта лишь для пластин, в которых используется заполнитель с высокой плотностью. При изменении толщины внешних слоёв или срединного заполнителя пластины увеличение различий между результатами расчёта происходит при увеличении суммарной массы и не связано при этом с изменением жёсткости пластины. Кроме того, процент отклонения результатов расчёта тем выше, чем выше порядковый номер определяемой частоты свободных колебаний.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении».

Список литературы

- 1 Громыко, Ю. В. Колебания трёхслойной круговой пластины с отверстием при резонансе / Ю. В. Громыко // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – № 11. – С. 41–48.
- 2 Леоненко, Д. В. Колебания круговых трёхслойных пластин на упругом основании Пастернака / Д. В. Леоненко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2014. – Т. 11, № 1. – С. 59–63.
- 3 Леоненко, Д. В. Свободные колебания круговых трёхслойных пластин на упругом основании / Д. В. Леоненко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2008. – Т. 5, № 3. – С. 42–47.
- 4 Старовойтов, Э. И. Колебания круговых композитных пластин на упругом основании под действием локальных нагрузок / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика композитных материалов. – 2016. – Т. 52, № 5. – С. 943–954.
- 5 Старовойтов, Э. И. Колебания круговых трёхслойных пластин под действием распределённых локальных нагрузок / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко, А. В. Яровая // Проблемы прочности. – 2002. – № 5. – С. 70–79.
- 6 Старовойтов, Э. И. Основы теории упругости, пластичности и вязкоупругости : учеб. для студентов строительных спец. вузов / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2001. – 344 с.
- 7 Маркова, М. В. Механико-математическая модель колебаний круговой трёхслойной пластины переменной толщины / М. В. Маркова // Актуальные вопросы физики и техники : материалы X Респ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 22 апреля 2021 г. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2021. – Ч. 1. – С. 308–310.
- 8 Гольденвейзер, А. Л. Свободные колебания тонких упругих оболочек / А. Л. Гольденвейзер, В. Б. Лидский, П. Е. Товстик. – М. : Наука, 1979. – 384 с.

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ НАЛИЧИИ РАССЛОЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

М. И. МАРТИРОСОВ, Д. В. ДЕДОВА

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Среди конструкционных материалов, используемых в настоящее время в авиационной технике (АТ), большое распространение приобретают полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые обладают определенным комплексом преимуществ по сравнению с традиционными металлическими материалами. Среди таких преимуществ следует выделить высокую удельную прочность и жёсткость, высокую износостойкость и термостойкость, сопротивление усталости, химическую и радиационную стойкость, низкие коэффициенты трения и термического расширения.

Действующими Авиационными правилами (АП) установлены требования к прочности и деформациям АТ для всех режимов эксплуатации, которые не зависят от используемого конструкционно-го материала (металл или ПКМ), из которого изготовлена конструкция АТ:

- конструкция должна выдерживать эксплуатационные нагрузки без появления опасных остаточных деформаций;
- конструкция должна выдерживать расчетные нагрузки без разрушения в течение трех секунд (не менее).

Традиционные конструкционные металлические материалы за счет стабильных характеристик, продолжительности периода сохранения механических и технологических свойств обеспечивают заданные прочностные характеристики конструкции АТ.

Уровень безопасности АТ, созданной на основе новых материалов (и новых технологий), должен быть не ниже уровня безопасности существующей АТ, изготовленной из традиционных конструкционных материалов (и по традиционным технологиям). Следует отметить, что целью разработки новых ПКМ является объединение различных компонентов для создания материалов с новыми заданными характеристиками, отличными от характеристик исходных компонентов.

Новые ПКМ применяются поэтапно. Сначала их используют для изготовления слабонагруженных (малонагруженных) элементов конструкции, а уже затем по результатам опыта эксплуатации принимается решение об использовании этих материалов и в более ответственных элементах.

При разработке АТ из ПКМ следует учитывать:

- повышенный разброс механических характеристик;
- влияние экстремальных значений факторов внешней среды и деградацию от длительного воздействия типовых параметров эксплуатации;
- снижение прочности от максимальных размеров допустимых дефектов и наличие остаточных напряжений;
- снижение прочности от наличия прогнозируемых повреждений;
- технологические особенности;
- и другие факторы.

Говоря о недостатках ПКМ можно отметить, что при производстве и эксплуатации элементов конструкций из таких материалов могут возникать дефекты различного характера, которые оказывают серьезное влияние на остаточную прочность. На практике в элементах конструкций из ПКМ встречаются следующие основные дефекты:

- непроклей – нарушение адгезионной связи между монослоями, образующими композитный пакет (КП), (например, после автоклавного формования);
- недостаточная пропитка связующим – нарушение адгезионной связи между слоями наполнителя в КП или отсутствие связующего в слое (слоях) наполнителя (производственный или технологический дефект);
- расслоение – нарушение адгезионной связи между слоями наполнителя в КП, вызванное механическими воздействиями ударного характера при эксплуатации или внутренними повреждениями в КП после формования или после проведения сборочно-монтажных работ;
- пористость – любая полость, содержащая воздух в структуре КП, вызывающая изменение его акустических характеристик (затухание ультразвука в ПКМ).

Такие дефекты относятся к внутренним, так как охватывают внутренние слои КП.

В работе рассматривается пластина прямоугольной формы заданной геометрии из ПКМ при наличии системы расслоений различной формы. Исследуются расслоения эллиптической формы с различным соотношением осей, круговой формы различного радиуса и прямоугольной формы с различным соотношением линейных размеров. Число таких дефектов может быть произвольным, располагаются они между монослоями КП также произвольным образом.

В качестве внешних нагрузок рассматриваются распространенные на практике варианты действия статических нагрузок и нагрузок динамических, изменяющихся во времени по заданными законам.

Пластина выполнена в виде многослойной конструкции с симметричной укладкой монослоёв: $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$. Всего в КП 14 монослоёв, каждый из которых изготовлен из однородного упругого ортотропного материала.

Материал пластины – однонаправленный 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). Технология изготовления – автоклавная. Из такого материала в авиации могут изготавли-

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 (НИИ), Российская Федерация

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