

внешней поверхности вблизи точки *C*. Там же имеет место максимальный изгиб. Вблизи «диагональных» точек *B* и *D*, в которых моменты достигают локальных максимумов, сечение разгибается.

Для сравнения в таблице 2 приведены аналогичные результаты для тора, поперечным сечением которого является суперокружность с параметрами: $R/h = 100$, $c/h = 200$, $n = 4$, $s_k/h = 351$.

Таблица 2 – Перемещения и напряжения в характерных точках тора, сечение – суперокружность

Точка	\tilde{s}	\tilde{y}	\tilde{w}	σ_s^+	σ_s^-	σ_θ^+	σ_θ^-
<i>A</i>	0	0	0,727	106	58	300	297
<i>B</i>	0,35	1,731	-2,02	-1318	1674	-1152	-916
<i>C</i>	0,5	0,807	30,64	2997	-2332	227	-260
<i>D</i>	0,65	-1,174	1,370	-1803	2617	432	1202
<i>E</i>	1,0	0	0,095	159	148	-99	-99

Сравнительно небольшая ($b/a = 1,1$) эллиптичность поперечного сечения ($n = 4$) оболочки приводит (таблица 1) к незначительному перераспределению моментов вблизи «диагональных» точек. А максимальные напряжения (точка *C*) несколько уменьшаются, в отличие от случая простого ($n = 4$) кругового и эллиптического сечений при прочих равных параметрах [3].

Данная осесимметричная задача может дополнить ряд так называемых патологических тестов.

Список литературы

- 1 **Lutskaya, I. V.** Modeling the Deformation of Orthotropic Toroidal Shells with Elliptical Cross-Section Based on Mixed Functionals / I. V. Lutskaya, V. A. Maksimyyuk, I. S. Chernyshenko // *Int. Appl. Mech.* – 2018. – Vol. 54, no. 6. – P. 660–665.
- 2 **Akgün, G.** Geometrically nonlinear transient analysis of laminated composite super-elliptic shell structures with generalized differential quadrature method / G. Akgün, H. Kurtaran // *Int. J. Non-Linear Mech.* – 2018. – Vol. 105. – P. 221–241.
- 3 **Chernyshenko, I. S.** On the Stress-Strain State of Toroidal Shells of Elliptical Cross Section Formed from Nonlinear Elastic Orthotropic Materials / I. S. Chernyshenko, V. A. Maksimyyuk // *Int. Appl. Mech.* – 2000. – Vol. 36, no. 1. – P. 90–97.

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПЛАСТИНЫ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА С ВНУТРЕННИМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

М. И. МАРТИРОСОВ, Д. В. ДЕДОВА

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

А. В. ХОМЧЕНКО

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

Механика разрушения полимерных композиционных материалов (ПКМ) достаточно сложна в силу анизотропии свойств монослоев, взаимного влияния напряжённо-деформированного состояния монослоев друг на друга, а также ввиду наличия повреждений.

Под повреждением будем понимать отклонение изделия от нормы, вызванное производством или эксплуатацией. Повреждение – нарушение исправного состояния изделия при сохранении его работоспособности. В авиации 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 событием, вызывающее повреждение.

Категория 1: Допустимое повреждение (порог контролепригодности в условиях эксплуатации и производства) менее того, которое может быть обнаружено с вероятностью не менее 95 % в процессе эксплуатации и на стадии производства. Обоснование допустимости повреждения Категории 1 включает демонстрацию сохранения уровня прочности не ниже расчётной в течение всего жизненного цикла изделия.

Категория 2: Повреждение, которое можно обнаружить при плановых или целевых осмотрах (с вероятностью не менее 95 %), проводимых через установленные в эксплуатационной документации интервалы (при визуальном и инструментальном контроле). Обоснование допустимости повреждения Ка-

тегории 2 включает демонстрацию сохранения уровня прочности не ниже $1,2 P_3$ (P_3 – эксплуатационная нагрузка) в течение времени, необходимого для обнаружения этого повреждения. Основными источниками повреждений Категории 2 являются ударные повреждения различной природы.

Категория 3: Повреждение, которое может быть надёжно обнаружено в пределах нескольких полётов техническим персоналом (с вероятностью не менее 90 %). Обоснование допустимости повреждения Категории 3 включает демонстрацию сохранения прочности не ниже P_3 в течение времени, необходимого для обнаружения этого повреждения.

Категория 4: Повреждение от дискретного источника при известном полётном событии. Обоснование прочности при повреждении Категории 4 включает демонстрацию остаточной прочности не ниже $0,7P_3$. К Категории 4 отнесён удар градины диаметром 64 мм с крейсерской скоростью полёта самолёта.

Категория 5: Серьёзное повреждение, вызванное аномальными наземными или полётными событиями, которое не входит в расчётные критерии или процедуры обоснования прочности конструкции. Единственным способом обеспечения безопасности конструкции самолёта от повреждений Категории 5 является немедленное сообщение о случившемся инциденте.

Все повреждения, снижающие прочность изделий из ПКМ в авиации до уровня ниже расчётной нагрузки, должны устраняться (ремонтироваться) по мере обнаружения, причем восстановление прочности до уровня расчётной нагрузки ремонтируемого изделия должно быть подтверждено расчётами и экспериментами.

В работе рассматривается пластина прямоугольной формы заданной геометрии из ПКМ при наличии системы расслоений эллиптической формы, произвольно расположенных между слоями пластины и имеющих различное соотношение осей. В качестве внешней нагрузки рассматриваются различные варианты действия статических нагрузок и нагрузок динамических, изменяющихся во времени по заданным законам.

Пластина выполнена в виде многослойной конструкции с симметричной укладкой монослоёв: $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$, толщина монослоя равна 0,19 мм. Материал пластины – 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. 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. Из такого материала в авиации могут изготавливаться изделия, входящие в перечень основных элементов (ОСЭ). ОСЭ – элементы основной силовой конструкции, которые воспринимают значительную долю полетных, наземных нагрузок и нагрузок от избыточного давления и 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 экспериментально по европейским стандартам EN производителем препрега для режима RTD (Room Temperature Dry): нормальная температура $+23^\circ\text{C}$ 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 %.

Слои пластины моделируются элементами со свойствами типа Composite в программном комплексе конечно-элементного анализа LS-DYNA (Lawrence Livermore National Laboratory). Все слои жестко сцеплены клеевым контактом, за исключением областей с повреждениями, в которых учитывается контактное взаимодействие. Граничные условия на границе соответствуют жесткому защемлению. Используется явная схема интегрирования полной системы уравнений метода конечных элементов (МКЭ).

Определяется поле индексов разрушения f (разрушение наступает при $f = 1$) в различные моменты времени при наличии и отсутствии повреждений при действии статической и динамической нагрузок. Рассматриваются следующие критерии разрушения для ПКМ: 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, Cuntze, LaRC (Langley Research Center).

Аналогичные расчеты были проведены и для однонаправленного углепластика на основе пре-

прега HexPly 8552/34%/UD134/AS4-12K (углеродная лента AS4 на основе углеродного волокна NewTow 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 – фирма Hexcel Composites (США).

Полученные численные результаты удовлетворительно совпадают с некоторыми имеющимися экспериментальными данными других авторов.

Предложенная методика численного моделирования поведения композитных пластин с учётом произвольно расположенных множественных межслоевых повреждений под действием статических и динамических нагрузок различного характера может быть использована при проектировании элементов конструкций из ПКМ для авиационной техники.

УДК 539.3

РАССЛОЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКИХ 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

Постоянное совершенствование конструкционных материалов является приоритетной задачей любой отрасли транспортного машиностроения. К таким материалам относятся полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые обладают рядом преимуществ: высокими жёсткостными и прочностными характеристиками, низкой удельной массой, высоким сопротивлением распространению трещин. В изделиях из ПКМ имеют место и недостатки: внутренние дефекты, которые могут возникать на различных этапах производства и эксплуатации. Дефекты, как правило, сопровождаются растрескиванием матрицы и разрушением волокон, что оказывает влияние на прочностные характеристики изделия.

В настоящей работе представлены результаты исследований динамики различных элементов конструкций с внутренними дефектами эллиптической формы типа расслоений под действием нестационарных нагрузок. Элементы конструкций выполнены из углепластиков на основе препрегов HexPly M21/34%/UD194/IMA (углелента с толщиной монослоя 0,19 мм) и HexPly M21/40%/285T2/AS4C (углеткань с толщиной монослоя 0,285 мм), предназначенных для производства изделий по автоклавной технологии. Упругие и прочностные характеристики известны, и получены 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 %).

Рассматриваемые элементы конструкций:

1 Прямоугольная пластина длиной $a = 400$ мм, шириной $b = 200$ мм со следующей схемой укладки: $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$. Между слоями № 1–2, № 2–3 и т. д. до № 6–7 расположены дефекты (расслоения) в форме эллипса с осями 46 и 26 мм. Здесь и далее рассматриваются дефекты, расположенные один под другим. В качестве внешнего воздействия рассматривается поле равномерного давления, распределённого на поверхности пластины и изменяющегося по следующему закону: $P(t) = p_0H(t)$, где $p_0 = 1,5$ МПа, $H(t)$ – функция Хэвисайда.