



Рисунок 1 – Фундаментальные решения для пластины Чоу из углепластика на упруго-инерционном основании в момент времени 8 мс:

a – функция $G_b(x_1, x_2, t)$; b – функция $G_s(x_1, x_2, t)$

Представленные на рисунке 1 результаты демонстрируют асимметричный характер распространения возмущений, что согласуется с моделью симметрии упругой среды. Видно, что сдвиг пластины вносит существенно меньший вклад в нормальное перемещение по отношению к вкладу от изгиба пластины.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ проект №20-19-00217.

Список литературы

- 1 Тарлаковский, Д. В. Общие соотношения и вариационные принципы математической теории упругости : учеб. пособие / Д. В. Тарлаковский, Г. В. Федотенков. – М. : Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. – 112 с.
- 2 Chow, T. S. On the Propagation of Flexural Waves in an Orthotropic Laminated Plate and Its Response to an Impulsive Load / T. S. Chow // Journal of Composite Materials. – 1971. – Vol. 5, is. 3. – P. 306–319. – DOI : 10.1177/002199837100500302.
- 3 Fallstrom, K. E. Transient Bending Wave Propagation in Anisotropic Plates / K. E. Fallstrom, O. Lindblom // J. Appl. Mech. – 1998. – 65(4). – P. 930–938. – DOI : 10.1115/1.2791937.
- 4 Макаревский, Д. И. Волны в анизотропной пластине Тимошенко большой протяженности / Д. И. Макаревский, Д. О. Сердюк, Г. В. Федотенков // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 54–68. – DOI : 10.33113/mkmk.ras.2023.29.01.04
- 5 Сердюк, А. О. Фундаментальное решение для анизотропной пластины на инерционном основании / А. О. Сердюк, Д. О. Сердюк, Г. В. Федотенков // Проблемы прочности и пластичности. – 2022. – Т. 84, № 4. – С. 523–535. – DOI : 10.32326/1814-9146-2022-84-4-523-535.

УДК 539.422.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГРАДА НА ПЛАСТИНУ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Т. А. СОКОЛОВА, М. И. МАРТИРОСОВ, А. В. ХОМЧЕНКО
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в различных отраслях промышленности. Из ПКМ, в частности, изготавливаются силовые элементы авиаконструкций.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом экспериментально и теоретически наряду с положительными свойствами ПКМ (малая плотность, высокая удельная прочность и жесткость, высокая износостойкость, сопротивление усталости, малый коэффициент температурного расширения, стойкость к химическим агрессивным средам, демпфирующая способность, высокая интегрированность и т. д.) подтверждены и некоторые их особенности отрицательного характера:

– повышенное (по сравнению с традиционными металлическими конструкционными материалами) рассеивание механических характеристик;

- значительное влияние на прочностные и упругие характеристики факторов окружающей среды (прежде всего влажности и температуры);
- повышенная чувствительность к технологическим и производственным отклонениям при изготовлении и сборочно-монтажных работах;
- появление повреждений (дефектов) при эксплуатации (например, под действием нагрузок ударного или импульсного характера);
- высокая чувствительность к концентраторам напряжений;
- многообразии форм разрушения;
- деградация механических характеристик со временем (старение);
- трудности соединения деталей из ПКМ между собой, а также с металлическими элементами.

В авиационной промышленности, где ПКМ используются в значительных объемах (несмотря на имеющиеся недостатки), прочность элементов конструкций должна быть обеспечена, в том числе, в случае воздействия дискретных источников. В результате воздействия дискретного источника на элемент конструкции из ПКМ в нём могут возникать повреждения, которые значительно снижают его прочностные и жёсткостные свойства.

Под повреждением понимается отклонение изделия от нормы, вызванное производством или эксплуатацией. Для доказательства прочности конструкций из ПКМ в авиации принято разделять повреждения на пять категорий в зависимости от требуемого уровня сохранения остаточной прочности, контролепригодности, интервала между осмотрами, условий появления повреждения и др.

Категория 1. Допустимые повреждения с вероятностью обнаружения не менее 90 % с уровнем доверия 95 % в процессе однократного выполнения любой формы эксплуатационного контроля.

Категория 2. Повреждения, которые можно обнаружить при плановых или целевых осмотрах (с вероятностью не менее 95 %), проводимых через установленные интервалы времени.

Категория 3. Повреждения, которые может надежно обнаружить в пределах нескольких полётов технический персонал (с вероятностью не менее 95 %), не обладающий специальными навыками контроля конструкций из ПКМ.

Категория 4. Повреждения от дискретного источника при известном полётном событии, которое приводит к ограничению в пилотировании для завершения полёта.

Категория 5. Серьёзные повреждения, вызванные аномальными наземными или полётными явлениями, которые не входят в расчётные критерии или процедуры обоснования прочности конструкции.

В работе рассматривается прямоугольная пластина из ПКМ под действием ударной нагрузки [1]. Количество монослоёв пластины и формат укладки варьируются. Все рассматриваемые укладки симметричные, смешанные и сбалансированные с типовыми углами $\pm 45^\circ$, 0° , 90° . Материалы монослоя – препреги на основе углелент и углетканей (M21/34%/UD194/IMA, M21/40%/285T2/AS4C) производства фирмы Hexcel Composites (США). Такие материалы используются для изготовления деталей авиационных конструкций по автоклавной технологии. Физико-механические характеристики монослоев считаются заданными, получены экспериментально производителем материалов и соответствуют режиму испытаний RTD (Root Temperature Dry) – испытания при комнатной температуре 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 %).

Конечно-элементная модель (КЭМ) пластины выполнена послойно из конечных элементов типа «TSHELL», задача решается в явной постановке путём прямого интегрирования уравнений движения с использованием центрально-разностной схемы в программном комплексе LS-DYNA (Lawrence Livermore National Laboratory).

В качестве нагрузки рассматривается ударное воздействие града шарообразной формы [2–8]. Рассматриваются градины диаметра $D = 40 \dots 60$ мм. Скорость соударения варьируется в диапазоне $V = 40 \dots 200$ м/с. Угол соударения $\alpha = 30 \dots 90^\circ$ (α – угол между вектором скорости и поверхностью пластины). В работе рассматривается попадание как одиночного града, так и множественного в различные точки пластины, в том числе повторное попадание в одну точку. Град моделируется с помощью метода гидродинамики сглаженных частиц SPH (smoothed particle hydrodynamics). Взаимодействие пластины и града осуществляется с помощью контакта «NODES_TO_SURFACE» и решается методом штрафа. В качестве модели материала града рассматривается упругопластическая

модель «MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION_EOS». Для описания поведения материала монослоёв пластины используется модель материала «LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC».

В результате решения получены поля перемещений, напряжений и деформаций в слоях элементов пластины, изменение контактной силы в точках соударения, изменение скорости и кинетической энергии града для различных моментов времени. Определяются максимальные индексы разрушения и минимальные коэффициенты запаса прочности по следующим критериям разрушения для ПКМ: Tsai-Wu, Tsai-Hill, Hoffman, Norris, Norris-Mckinnon, Fischer, Puppo-Evensen, Hashin, Chang-Chang, Puck, LaRC (Langley Research Center) [9, 10].

Список литературы

- 1 **Соколова, Т. А.** Численное исследование деформирования элементов авиационных конструкций из полимерных композитов при динамических воздействиях / Т. А. Соколова, М. И. Мартиросов, А. В. Хомченко // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXIX Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. – М. : МАИ, 2023. – Т. 1. – С. 188–190.
- 2 **Liu, P. F.** Failure analysis of carbon fiber/epoxy composite cylindrical laminates using explicit finite element method / P. F. Liu, L. J. Xing, J. Y. Zheng // Composites. Part B. – 2014. – Vol. 56. – P. 54–61.
- 3 **Fasnella, E. L.** Test and Analysis Correlation of High Speed Impacts of Ice Cylinders / E. L. Fasnella, R. L. Boinot // 9th International LD-DYNA Users Conference.
- 4 **Schulson, E. M.** Brittle Failure of Ice/ E. M. Schulson // Engineering Fracture Mechanics, 2001. – No. 68. – P. 1839–1887.
- 5 **Gurthar, A.** Experimental and Numerical Investigation of Ice-Structure Interaction. / A. Gurthar // Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology. – No. 2009:26.
- 6 **Petrovic, J. J.** Review Mechanical properties of ice and snow/ Journal of materials science / J. J. Petrovic. – 2003. – No. 38. – P. 1–6.
- 7 **Kimand, H.** Modeling Hail Ice Impacts and Predicting Impact Damage Initiation in Composite Structures/ H. Kimand, K. T. Kedward // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. – 2000. – No. 7. – P. 1278–1288.
- 8 **Monaghan, J. J.** Shock Simulation by the Particle Method of SPH / J. J. Monaghan, R. A. Gingold // Journal of Computational Physics. – 1983. – No. 52. – P. 74–381.
- 9 **Гриневич, Д. В.** Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) / Д. В. Гриневич, Н. О. Яковлев, А. В. Славин // Труды ВИАМ. – № 7. – 2019. – С. 92–111.
- 10 Assessment of the strength of a composite package with internal defects according to various failures criteria under the influence of unsteady load / A. L. Medvedskiy [et al.] // Periodico Tche Quimica. – 2020. – Vol. 17, no. 35. – P. 1218–1230.

УДК 539.3

КОЛЕБАНИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОТОКЕ

Э. И. СТАРОВОЙТОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Д. В. ТАРЛАКОВСКИЙ, Г. В. ФЕДОТЕНКОВ

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Российская Федерация

Современные требования машиностроения к оценке прочностных характеристик композитных конструкций обуславливают необходимость создания расчетных моделей, учитывающих динамические нагрузки. Этой проблеме посвящен ряд публикаций. В монографиях [1–5] предложены общие подходы к постановке и решению соответствующих начально-краевых задач. Колебания неоднородных пластин и оболочек исследовались в статьях [6–11]. Отдельные задачи квазистатического деформирования упругих и физически нелинейных трехслойных элементов конструкций, в том числе связанных с упругим основанием, при однократных и циклических нагрузках решены в работах [11–19].

Здесь для трехслойного пакета пластины приняты гипотезы ломаной линии. Для несущих слоев несимметричной по толщине трехслойной круговой пластины принимаются гипотезы Кирхгофа. В жестком наполнителе справедлива гипотеза Тимошенко о прямолинейности и несжимаемости деформированной нормали, которая поворачивается на некоторый дополнительный угол $\psi(r)$. Искомыми функциями считаются также прогиб $w(r)$ и радиальное перемещение срединной плоскости наполнителя $u(r)$. Учтена работа наполнителя в тангенциальном направлении. Постановка задачи и ее решение проводятся в цилиндрической системе координат. Срединная плоскость наполнителя принимается за координатную, ось z направлена перпендикулярно вверх, к первому слою.