

Выводы. Предложенная математическая модель термосилового резонансного воздействия на трехслойную упругую круговую пластину позволяет учитывать влияние температуры окружающей среды на параметры колебаний. Численная апробация решения показала, что при резонансе по более высокой собственной частоте происходит уменьшение скорости увеличения амплитуды колебаний за принятый интервал времени. Например, максимальный прогиб при частоте ω_0 больше соответствующего прогиба при частоте ω_1 примерно в 15 раз. Нагревание пластины приводит к росту прогиба на 11 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Конвергенция-2025».

Список литературы

- 1 Горшков, А. Г. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – М. : Физматлит, 2005. – 576 с. – EDN RXGSLJ.
- 2 Журавков, М. А. Математические модели механики твердого тела / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2021. – 535 с.
- 3 Zhuravkov, M. A Mechanics of Solid Deformable Body / M. A. Zhuravkov, Lyu Yongtao, E. I. Starovoitov. – Singapore : Springer, 2022. – 317 p.
- 4 Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагружениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : IDEAL PRESS, 2023. – 381 с.
- 5 Carrera, E. Thermal Stress Analysis of Composite Beams, Plates and Shells : Computational Modelling and Applications / E. Carrera, F. A. Fazzolari, M. Cinefra. – Academic Press, 2016. – 440 p.
- 6 Деформирование трехслойных пластин при термосиловых нагрузках / Э. И. Старовойтов [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 395 с.
- 7 Старовойтов, Э. И. Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 162–169.
- 8 Leonenko, D. V. Vibrations of Cylindrical Sandwich Shells with Elastic Core Under Local Loads / D. V. Leonenko, E. I. Starovoitov // International Applied Mechanics. – 2016. – Vol. 52, no 4. – P. 359–367. – DOI : 10.1007/s10778-016-0760-8.
- 9 Tarlakovskii, D. V. Two-Dimensional Nonstationary Contact of Elastic Cylindrical or Spherical Shells / D. V. Tarlakovskii, G. V. Fedotenko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol. 43, no. 2. – P. 145–152.
- 10 Старовойтов, Э. И. Изгиб упругой круговой трехслойной пластины на основании Пастернака / Э. И. Старовойтов, А. Г. Козел // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 392–406.
- 11 Козел, А. Г. Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины на основании пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации. – Гомель : БелГУТ, 2018. – Вып. 11. – С. 127–133.
- 12 Трацевская, Е. Ю. Динамическая неустойчивость квазитрехослоенных моренных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Литосфера. – 2017. – № 1 (46). – С. 107–111.
- 13 Захарчук, Ю. В. Перемещения в круговой трехслойной пластине со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – Гомель : БелГУТ, 2017. – Вып. 10. – С. 55–66.
- 14 Нестерович, А. В. Напряженное состояние круговой трехслойной пластины при осесимметричном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – Гомель : БелГУТ, 2019. – Вып. 12. – С. 152–157.
- 15 Деформирование ступенчатой композитной балки в температурном поле / Э. И. Старовойтов [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 4. – С. 987–993.
- 16 Старовойтов, Э. И. Деформирование трехслойного стержня в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 1 (22). – С. 31–35.

УДК 539.3

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕПЛООВОГО УДАРА НА ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ

Э. И. СТАРОВОЙТОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Д. В. ТАРЛАКОВСКИЙ, Г. В. ФЕДОТЕНКОВ

НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Трехслойные элементы конструкций, в том числе пластины, широко применяются с середины прошлого века в транспортном машиностроении и строительстве. Для проведения их прочностных расчетов возникает необходимость создания расчетных математических моделей, чему и посвящен многочисленный ряд публикаций.

Монографии [1–7] посвящены построению математических моделей деформирования трехслойных элементов конструкций при квазистатических и динамических нагрузках. Свободные, вынужденные и резонансные колебания трехслойных пластин и оболочек, в том числе при нестационарных нагрузках исследовались в работах [8–12]. Статьи [13–18] посвящены квазистатическому деформированию трехслойных стержней и пластин.

В предлагаемой работе исследовано воздействие теплового удара на вынужденные колебания круговой трехслойной пластины, возбужденные импульсной нагрузкой. Предполагается, что трехслойная круговая пластина шарнирно оперта по контуру. На нее в начальный момент падают тепловой поток интенсивностью q_i и равномерно распределенный силовой импульс

$$q(r, t) = q_1 \delta(t),$$

где $q_1 = \text{const}$ – интенсивность импульса; $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака.

Распределение нестационарной температуры по толщине пластины вычисляется по приближенной формуле, полученной в [1]. Используя гипотезу Неймана, на свободные колебания, вызванные тепловым ударом (мгновенным падением теплового потока), накладываются вынужденные колебания от импульсной нагрузки.

Для несущих слоев трехслойной круговой пластины принимаются гипотезы Кирхгофа. В легком заполнителе 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 заполнителя $u(r)$. Проведен вывод системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих поперечные колебания упругой круговой трехслойной пластины в температурном нестационарном поле. Полный прогиб представляется в виде суммы квазистатического w_s и динамического w_d прогибов, где

$$w_s = r_0^2 M_i \left[1 - (r/r_0)^2 \right] / 2(a_7 + a_8).$$

Начальные условия неоднородные, в них появляется ненулевая скорость:

$$w_d = 0, \quad \dot{w}_d = -r_0^2 \dot{M}_i(0) \left[1 - (r/r_0)^2 \right] / 2(a_7 + a_8).$$

Динамическая составляющая w_d представляется в виде разложения в ряд по системе собственных ортонормированных функций. Проведен численный параметрический анализ зависимости собственных чисел и частот колебаний от температуры, материалов и толщин слоев.

Искомое решение выписано в виде разложения в ряд по системе собственных ортонормированных функций. Приведены расчетные формулы для перемещений и относительного сдвига в заполнителе. Проведен численный параметрический анализ прогиба пластины и частот собственных колебаний в зависимости от интенсивности и времени воздействия теплового потока, геометрических параметров пластины, материалов несущих слоев.

Предложенная механико-математическая модель термосилового динамического воздействия на трехслойные упругие круговые пластины позволяет учитывать влияние теплового удара на параметры колебаний. При шарнирно опертом контуре пластины тепловой удар приводит к возникновению свободных колебаний, на которые накладываются вынужденные колебания от импульсной силовой нагрузки. Численные исследования показали, что увеличение жесткости материала несущего слоя приводит к уменьшению квазистатической составляющей прогиба.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Конвергенция-2025».

Список литературы

- 1 Горшков, А. Г. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – М. : Физматлит, 2005. – 576 с. – EDN RXGSLJ.
- 2 Журавков, М. А. Математические модели механики твердого тела / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2021. – 535 с.
- 3 Zhuravkov, M. A. Mechanics of Solid Deformable Body / M. A. Zhuravkov, Lyu Yongtao, E. I. Starovoitov. – Singapore : Springer, 2022. – 317 p.
- 4 Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагружениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : IDEAL PRESS, 2023. – 381 с.
- 5 Деформирование трехслойных пластин при термосиловых нагрузках / Э. И. Старовойтов [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 395 с.
- 6 Тарлаковский, Д. В. Общие соотношения и вариационные принципы математической теории упругости : учеб. пособие / Д. В. Тарлаковский, Г. В. Федотенков. – М. : МАИ-Принт, 2009. – 111 с. – EDN QJWNEP.

- 7 **Carrera, E.** Thermal Stress Analysis of Composite Beams, Plates and Shells : Computational Modelling and Applications / E. Carrera, F. A. Fazzolari, M. Cinefra. – Academic Press, 2016. – 440 p.
- 8 **Старовойтов, Э. И.** Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – 21, № 2. – С. 162–169.
- 9 **Tarлакoвskii, D. V.** Two-Dimensional Nonstationary Contact of Elastic Cylindrical or Spherical Shells / D. V. Tarлакoвskii, G. V. Fedotenkov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol. 43, no. 2. – P. 145–152.
- 10 **Вестяк, В. А.** Распространение нестационарных объемных возмущений в упругой полуплоскости / В. А. Вестяк, А. С. Садков, Д. В. Тарлаковский // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2011. – № 2. – С. 130–140. – EDN NHLAQR.
- 11 Воздействие нестационарного давления на тонкую сферическую оболочку с упругим наполнителем / А. В. Вестяк [и др.] // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9, № 4. – С. 443–452. – DOI : 10.7242/1999-6691/2016.9.4.37. – EDN XDDTSX.
- 12 **Трацевская, Е. Ю.** Демпфирующие свойства слабосвязных трехфазных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Литосфера. – 2017. – № 2 (51). – С. 115–121.
- 13 Деформирование ступенчатой композитной балки в температурном поле / Э. И. Старовойтов [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 4. – С. 987–993. – EDN UARYZD.
- 14 **Старовойтов, Э. И.** Изгиб трехслойной пластины равномерно распределенной нагрузкой в нейтронном потоке / Э. И. Старовойтов // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 3 (48). – С. 56–62. – DOI : 10.54341/20778708_2021_3_48_56. – EDN ZPDZRF.
- 15 **Старовойтов, Э. И.** Деформирование трехслойной упругопластической пластины погонными нагрузками / Э. И. Старовойтов, М. А. Журавков // Механика. Исследования и инновации. – Гомель : БелГУТ, 2019. – Вып. 12. – С. 191–197. – EDN CYOCOI.
- 16 **Starovoitov, E. I.** Thermal effect on deformation of a sandwich rod with compressible filler / E. I. Starovoitov, A. D. Zeyad // Материалы, технологии, инструменты. – 2009. – Vol. 14, no. 1. – P. 16–22. – EDN YIEDCE.
- 17 **Старовойтов, Э. И.** Изгиб трехслойной пластины в температурном поле моментной нагрузкой / Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая, А. Абдусаттаров // Механика. Исследования и инновации. – Гомель : БелГУТ, 2023. – Вып. 16. – С. 189–195. – EDN FWEFAI.
- 18 **Starovoitov, E. I.** Study of dynamic characteristics of three-phase soils and three-layer beams / E. I. Starovoitov, E. Y. Tratsevskaya, E. L. Kuznetsova // Journal of the Balkan Tribological Association. – 2021. – Vol. 27, no. 5. – P. 929–946. – EDN XNIYPS.

УДК 620.179

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОВРЕЖДЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРУИ ВОДЫ

СУНЬ ИН, Л. Н. РАБИНСКИЙ, А. В. БАБАЙЦЕВ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Когда самолет проходит через дождливую зону на высокой скорости, покрытие на передней кромке фюзеляжа будет постоянно разъедаться каплями дождя, что приведет к износу, растрескиванию или даже отслаиванию покрытия. В работе в качестве базового материала исследуется полимерный композиционный материал при различных скоростях и количестве ударов использовалось оборудование, чтобы смоделировать эрозию покрытия, вызванную непрерывным воздействием капель воды. Морфология повреждений образцов на различных стадиях повреждения наблюдалась с помощью цифрового микроскопа и сканирующего электронного микроскопа (SEM). Кривая эволюции повреждений была создана для анализа и выявления поведения повреждений и механизма повреждения при дождевой эрозии. Результаты показывают, что степень повреждения имеет тенденцию к увеличению с ростом числа ударов и скорости, вплоть до образования кругового повреждения в виде корки; в инкубационный период повреждения не возникали, а кривизна кривой эволюции повреждения значительно увеличилась после периода расширения и в конечном итоге показала стабильную тенденцию расширения. Механические свойства материала покрытия являются основными факторами, влияющими на его стойкость к дождевой коррозии. Кроме того, была исследована осесимметричная нестационарная контактная задача о падении капель на поверхность твердого деформируемого тела. Площадь контакта определялась на основе метода граничного позиционирования с итерационным алгоритмом. Предложены математическая модель и замкнутая математическая формула, описывающая нестационарное взаимодействие капли с твердым деформируемым препятствием.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-49-00133 со стороны РФ, проект № 12261131505 со стороны Китая).