

– предел прочности при растяжении возрастает с увеличением содержания углеродного волокна, в то время как пластичность понижается;

– добавление частиц углеродного волокна в матрицу также увеличивает твердость.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код проекта FSFF-2020-0016).

УДК 539.3

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ С ВИСКЕРИЗОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ

*А. В. БАБАЙЦЕВ, В. Н. ДОБРЯНСКИЙ, Г. И. КРИВЕНЬ, А. А. ОРЕХОВ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Исследуется эффективный модуль потерь межфазного слоя композитов с вискеризованными волокнами при помощи метода Рейсса и метода трех фаз, позволяющего учитывать геометрические особенности строения композита. Рассматривается композит, состоящий из углеродного волокна, выращенными на его поверхности углеродными нанотрубками (межфазный слой), и эпоксидной матрицы. Построены зависимости эффективного модуля потерь при сдвиге вдоль вискерсов и поперек вискерсов от объемного содержания включения – вискерсов.

Установлено, что даже при относительно небольших объемных содержаниях вискерсов (менее 0,5) модуль потерь вискеризованного слоя превышает модуль потерь эпоксидной матрицы более чем в 5 раз, что дает основания полагать, что модифицированные композиты с вискеризованными волокнами обладают лучшими диссипативными свойствами, нежели классические волокнистые композиты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 21-38-70008.

УДК 531.383

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НАНОДАТЧИКА НА ОСНОВЕ НОВОЙ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТЕОРИИ ПАРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

*М. А. БАРУЛИНА, С. А. ГАЛКИНА, Д. В. КОНДРАТОВ
Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук
(ИПТМУ РАН), г. Саратов*

*И. А. ИЗНАИРОВ, М. А. СИДОРОВА
НПП «Антарес», г. Саратов, Российская Федерация*

В настоящее время на высокоскоростном транспорте применяются различные приборы навигации, к которым предъявляются высокие требования по энергоэффективности, точности и надежности [1]. Современное состояние техники также предъявляет высокие требования к размерам приборов навигации, что определяет необходимость создания миниатюрных приборов высокой степени точности и надежности. Следует заметить, что такая постановка проблемы диктует необходимость использования новых чувствительных элементов, таких как анизотропные и ортотропные нанопластины, размеры которых не превышают 100–200 нм [2]. Исследование нанопластин достаточно активно обсуждается в современной литературе. Так, в работах [3, 4] на основе некоторых теорий были рассмотрены свойства, а также механические и тепловые свойства композитных графеновых нанопластин [3], а в [4] был произведен анализ свободных колебаний осесимметричных круглых наноразмерных пластин. Таким образом, необходимо

определить динамику поведения анизотропных и ортотропных нанопластин как чувствительных элементов приборов навигации.

При построение адекватной модели поведения наноразмерной пластины возникает проблема невозможности применения классической теории упругости. Это связано с существующими ограничениями теории упругости, например, нарушается гипотеза сплошности. Разрабатываемые в настоящее время теории пытаются устранить ограничения классического подхода. Одной из таких теорий является новая модифицированная теория парных напряжений, которая была разработана W. Chen и X. Li [5], которая содержит три параметра масштаба длины материала (размерно зависимые параметры), которые позволяют учитывать влияние несплошности нанопластины на ее деформацию.

Будем рассматривать ортотропную нанопластину, к которой приложена распределенная нагрузка (рисунок 1).

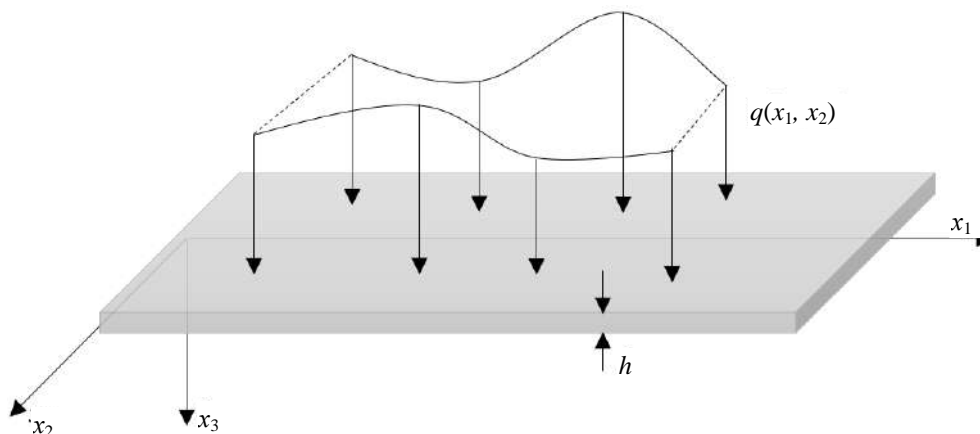


Рисунок 1 – Нанопластина с системой координат и приложенной нагрузкой

Для описания поля перемещений для нанопластин представляется актуальным использование теории изгиба пластин третьего порядка, которая позволяет учесть нелинейность изгиба нанопластины, а именно, перемещение в любой точке пластины может быть записано в виде

$$u_1(x_1, x_2, x_3, t) = u_0(x_1, x_2, t) + x_3 \varphi_1(x_1, x_2, t) - \frac{4}{3h^2} x_3^3 \left(\varphi_1(x_1, x_2, t) + \frac{\partial w_0(x_1, x_2, t)}{\partial x_1} \right),$$

$$u_2(x_1, x_2, x_3, t) = v_0(x_1, x_2, t) + x_3 \varphi_2(x_1, x_2, t) - \frac{4}{3h^2} x_3^3 \left(\varphi_2(x_1, x_2, t) + \frac{\partial w_0(x_1, x_2, t)}{\partial x_2} \right),$$

$$u_3(x_1, x_2, x_3, t) = w_0(x_1, x_2, t).$$

На основе вышеперечисленных теорий с использованием интегрального принципа Гамильтона, были выведены уравнения динамики ортотропной нанопластины [6, 7] и сформулированы естественные граничные условия. В результате получили математическую модель свободно опертой прямоугольной ортотропной пластины, находящейся под воздействием распределенной нагрузки.

Далее произвели исследование построенной математической модели. Было получено аналитическое решение в виде двойных рядов Фурье для перемещений упругой ортотропной пластины. При этом результаты прогиба, полученные аналитически, совпали с результатами прогиба, полученными численными методами.

Аналитически исследования показали отсутствие влияния на смещение точек срединной поверхности в плоскости пластины от масштабных параметров материала в тех же направлениях. Эти смещения зависят от параметра масштаба длины материала, заданного в направлении, нормальном к рассматриваемым смещениям. Произведена верификация построенной математической модели с численным решением пакета ANSYS. Сравнение показало, что различие результатов составляет менее 0,8 %. Что может говорить об адекватности построенной математической модели динамики поведения ортотропной пластины с использованием модифицированной теории парных напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-08-00807-а).

Список литературы

- 1 Методы и результаты испытаний инерциальных датчиков, предназначенных для эксплуатации на летательных аппаратах вертолётного типа / Р. В. Ермаков [и др.] // XXIV Санкт-Петербургская междунар. конф. по интегрированным навигационным системам : сб. материалов ; гл. ред. В. Г. Пешехонов. – СПб., 2017. – С. 244–248.
- 2 **Кондратов, Д. В.** Математическая модель круглого чувствительного элемента нанодатчика / Д. В. Кондратов, М. А. Барулина, С. А. Галкина // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2020. – № 3. – URL: mathmod.esrae.ru/31-118.
- 3 Mechanical and thermal properties of Graphene nanoplates (GNPs). Lithium aluminosilicate (LAS) composites: An analysis based on mathematical model and experiments / Ma G. [et al.] // Ceramics International. – 2020. – 46, 10903–10909. – doi:10.1016/j.ceramint.2020.01.104.
- 4 **Sapsathiarn, Y.** Finite-Element Modeling of Circular Nanoplates / Y. Sapsathiarn, R.K.N.D. Rajapakse // Journal of Nanomechanics and Micromechanics. – 2013. – Vol. 3. – P. 59–66. – doi:10.1061/(ASCE)NM.2153-5477.0000056.
- 5 **Chen, W.** A model of composite laminated Reddy plate based on new modified couple stress theory / W. Chen, X. Ma, L. Li // Composite Structures 94. – 2012. – P. 2143–2156.
- 6 **Барулина, М. А.** Уравнения движения чувствительного элемента НЭМС-датчика как прямоугольной размерно-зависимой нанопластины / М. А. Барулина // Нано- и микросистемная техника. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 164–171.
- 7 **Барулина, М. А.** Аналитическое решение уравнений движения чувствительного элемента наносенсора как прямоугольной свободно опертой нанопластины / М. А. Барулина, Д. В. Кондратов, С. А. Галкина // Нано- и микросистемная техника. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 115–121.

УДК 519.71, 51-74, 681.5, 303.732.4, 62.752; 621.534; 629.4.015

НАСТРОЙКА ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОМОЩИ СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Р. С. БОЛЬШАКОВ¹, С. К. КАРГАПОЛЬЦЕВ², С. В. ЕЛИСЕЕВ¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Российская Федерация

Эксплуатация технических объектов различного назначения, в том числе транспортных и технологических машин, подвержена влиянию негативных факторов. К их числу могут быть отнесены вибрационные процессы, проявляющиеся при работе двигателей, валов, компрессоров и других агрегатов, что инициирует необходимость поиска и разработки способов и средств их снижения, их действия как на основные узлы и агрегаты, так и на оборудование в целом [1, 2]. Для оценки динамического состояния технических объектов используются кинематические параметры, а также подходы с использованием структурного математического моделирования, когда расчетной схеме технического объекта в виде механической колебательной системы сопоставляется эквивалентная в динамическом отношении система автоматического управления [3, 4]. Формирование нужных динамических режимов также связано с выработкой конструктивно-технических решений, направленных на контроль различных динамических эффектов, возникающих при функционировании технических объектов [5, 6], а также расширение набора параметров динамического состояния за счет динамических реакций связей [7, 8].

В предлагаемом докладе рассматривается использование упруго-демпфирующих элементов для изменения параметров динамического состояния технического объекта.

I. Общие положения. Постановка задачи

Принципиальная схема технического объекта представлена на рисунке 1, *a*, где приведены упругие пневмобаллоны с объемами V_1 и V_2 ; демпферные камеры с объемами V_{10} и V_{20} ; $b_1 \div b_5$ – дроссельные устройства для диссипации энергии колебаний при прохождении потоков воздуха. В данном случае упругая опора представляет собой упругодемпфирующий блок из последовательно соединённых упругой и демпферной камер, соединённых дросселем, обладающих динамическими свойствами сложного составного элемента, собранного из нескольких типовых звеньев. Расчетная схема представлена в виде механической колебательной системы, которая состоит из твёрдых тел с массой M и моментом инерции J . Твёрдое тело имеет упругие опоры и совершает плоское колебательное движение в системе координат (y_1 и y_2), связанной с неподвижным базисом.

Динамические свойства системы, как следует из принципиальной схемы на рисунке 1, определяются возможностями коммутации элементов через дроссели. При определённых условиях,