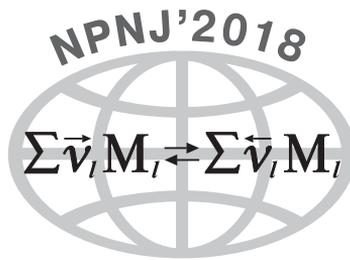




Dedicated to the memory of academician Yu.A. Ryzhov

**PROCEEDINGS
OF THE XII INTERNATIONAL CONFERENCE
ON APPLIED MATHEMATICS AND MECHANICS
IN AEROSPACE INDUSTRY**



**24–31 May, 2018
Alushta, Crimea**



УДК 519.6:517.958:533.6
ББК 27.5.14.4
М34

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-08-20036)
и Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)

М34 **Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), 24–31 мая 2018 г., Алушта.** — М.: Изд-во МАИ, 2018. — 768 с.: ил.

ISBN 978-5-4316-0491-1

Сборник включает в себя научные работы, отражающие современные достижения в газовой динамике струй и сопел, механике многофазных сред, плазменной аэродинамике, аэрокосмической механике, механике деформируемого твердого тела, прочности, разрушения и безопасности конструкций, а также в ряде смежных областей.

Для специалистов в области прикладной математики и механики, математического моделирования, информационных технологий, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), Алушта

Дизайн и компьютерная верстка *Ал. А. Пярнпуу*

Подписано в печать 24.04.18. Формат 70 × 100 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 62,4.
Тираж 350 экз. Изд. № 613. Заказ № 25/04/25-2121

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «Компания АРТИШОК»,
125362, Москва, ул. Свободы, д. 35, стр. 3, e-mail: info@artishok.ru

ISBN 978-5-4316-0491-1

© Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет), 2018

Из (1) следует, что стационарными значениями являются

$$I_1 = I_{10} = \frac{H(A + P_1)}{(A + P_1) - (C + P)}, \quad I_1 = I_2.$$

Из уравнений в вариациях находим, что первое стационарное положение устойчиво, если

$$\lambda < 0, \quad \lambda = n_1 \left[\frac{1}{C + P} - \frac{1}{A + P_1} \right] \left[\frac{I_{10}}{(A + P_1)} - \frac{2(I_{10} - H)}{C + P} \right]^2,$$

что, в свою очередь, приводит к условию устойчивости первого стационарного положения в виде $C + P > A + P_1$, и неустойчивости при $C + P < A + P_1$.

Из уравнений в вариациях также следует, что второе стационарное положение устойчиво при выполнении условия $I_2 < I_{20} = \frac{H(A + P_1)}{(A + P_1) - (C + P)}$, и неустойчиво при $I_2 > I_{20}$.

УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ*

И. Ю. Смолин^{1,2}, О. И. Казакова^{1,3}, И. М. Безмозгий^{1,3}

¹ТГУ, Томск, Россия; ²ИФПМ СО РАН, Томск, Россия;

³РКК «Энергия», Королев, Московская обл., Россия

Динамическая конечно-элементная модель (КЭМ) играет важную роль в вопросах обеспечения прочности конструкции при воздействии динамических нагрузок. Для создания достоверных моделей требуются жесткостные и диссипативные свойства материалов. В связи с ростом применения в современных конструкциях композиционных материалов, упругие свойства которых известны, хотя, зачастую, требуют уточнения, а сведения о демпфирующих свойствах которых отсутствуют, становятся актуальными задачи определения указанных свойств таких материалов для использования их при расчете откликов конструкции при динамическом нагружении.

Экспериментальные и теоретические исследования указывают на влияние на коэффициент внутреннего трения значений амплитуд колебаний, которые в свою очередь зависят от уровней входного воздействия [1–3]. В тоже время современные программные комплексы численного моделирования, такие как ANSYS, NASTRAN, ABACUS, позволяют использовать различные виды демпфирования, ни одно из которых не может быть задано функцией от напряжения, деформации или амплитуды колебаний. Целью данной работы является разработка подходов, позволяющих реализовать создание нелинейной динамической модели конструкций с коэффициентами демпфирования, зависящими от напряжений. Для достижения данной цели работа была разбита на два этапа. Первый заключается в выявлении зависимостей относительного демпфирования от уровней деформации/напряжения в композиционных материалах различной структуры. Второй — в разработке алгоритма применения этих зависимостей для задач моделирования динамических испытаний.

* Данное научное исследование выполнено при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Для проведения испытаний были изготовлены плоские композитные образцы в виде прямоугольных пластин с постепенным усложнением схемы укладки от однослойной до двенадцатислойной структуры. Были построены конечно-элементные модели экспериментальных образцов. На рис. 1 показан композиционный образец с десятислойной схемой укладки и его КЭМ.



Рис. 1. Композиционный образец (а) и его КЭМ (б)

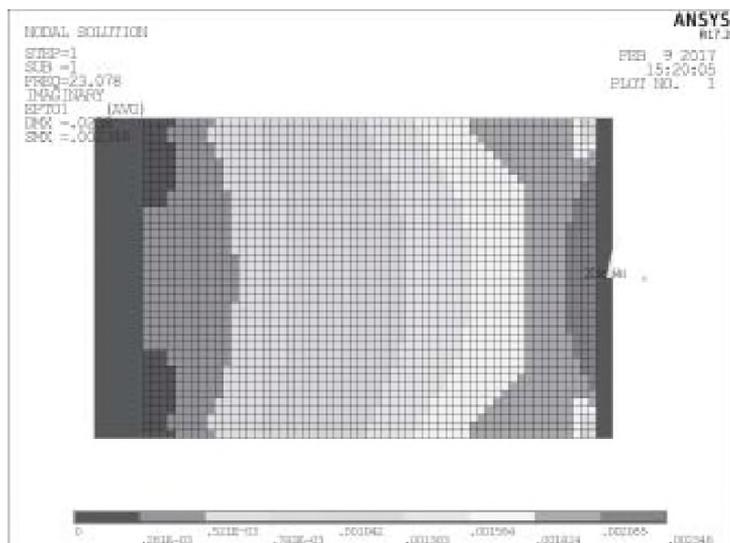


Рис. 2. Распределение главной деформации по поверхности образца

На образцах были проведены три вида экспериментальных исследований. Первый — это модальные испытания с использованием лазерного виброметра фирмы Polytec. Второй вид — гармонические испытания при различных уровнях входного воздействия от 0,2g до 1,5g. И третий вид испытаний — свободные затухания колебаний. При всех испытаниях образцы были закреплены консольно. Определение значений коэффициентов демпфирования по резонансному пику или по временной зависимости амплитуды виброускорений, полученных при испытаниях, дают интегральное значение демпфирования образца под динамической нагрузкой [4]. Данное значение может измениться при изменении конструкции образца. Поэтому его следует пересчитать в значения демпфирования для материала, причем для разных уровней деформации/напряжения. Для этого в данной работе применен расчетно-экспериментальный подход, использующий, кроме данных экспериментов, данные компьютерного моделирования на основе КЭМ-образцов.

Жесткостные характеристики КЭМ-образцов были настроены по результатам модельных испытаний. Для моделирования демпфирования, зависящего от уровня деформации/напряжения в образце, каждому конечному элементу модели был присвоен свой материал и каждому из этих материалов был задан свой коэффициент демпфирования, который после расчета изменялся в модели в зависимости от реализованного в нем уровня главной деформации. Этот процесс осуществляет внешняя надстройка над ANSYS, написанная на языке программирования python. На рис. 2 показано распределение главной деформации по поверхности образца под воздействием гармонической нагрузки.

В работе применена степенная модель зависимости коэффициента демпфирования от деформации. Нахождение значений коэффициентов модели осуществляется решением оптимизационной задачи с помощью комплекса pSeven DATADVANCE. В качестве целевых функций служат отклонения результатов расчета на основе КЭМ-образцов от результатов испытаний. Полученные таким образом закономерности планируются использовать для моделирования поведения конструкции при различных уровнях динамического воздействия.

1. Шорр Б. Ф., Серебряков Н. Н. Расчетно-экспериментальный анализ амплитудно-зависимых характеристик демпфирования в деталях и материалах // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2011. — №3. — С. 91–99.
2. Паймушин В. Н., Фирсов В. А., Гюнал И., Шишкин В. М. Идентификация характеристик упругости и демпфирования углепластика на основе исследования затухающих изгибных колебаний тест-образцов // Прикладная механика и техническая физика. — 2016. — Т. 57, №4. — С. 170–181.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). — М.: Машиностроение, 1981. — Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К. В. Фролова. — 456 с.
4. Смолин И. Ю., Безмозгий И. М., Казакова О. И. Расчетно-экспериментальный анализ демпфирующих характеристик углепластиков при динамическом воздействии // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016): Сборник трудов IX всероссийской научной конференции, 21–25 сентября 2016 г., г. Томск. — Томск: Томск. гос. ун-т, 2016. — С. 226–228.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРУГОГО КОЛЬЦА С ФИКСАТОРАМИ В ВИДЕ КОЛЬЦЕВЫХ НАКЛАДОК

А. А. Тырымов

ВолгГТУ, Волгоград, Россия

В работе [1] предлагается численный метод анализа напряженно-деформированного состояния упругой среды на основе дискретной модели в виде ориентированного графа. В ней построена графовая модель упругой среды в полярной системе координат. В процессе анализа на основе графового подхода тело рассекаем на элементы и для каждого из них строим элементарную ячейку (подграф), являющуюся его моделью. Уравнение элементарной ячейки получаем, пользуясь инвариантом, сохраняющимся при преобразовании элемента в ячейку. В качестве инварианта используем энергию деформации. Описана процедура определения параметров элементарной ячейки. Граф всего тела строится по тому же принципу, что и элементарная ячейка. Вывод определяющей системы уравнений основан на использова-