

УДК 624.074.4+539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Г. Е. Макаров

*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск*

Предлагается простой способ определения упругих и демпфирующих характеристик конструкционных материалов (в том числе и композиционных) по свободным затухающим колебаниям кольцевого образца. Возбуждение процесса колебаний производится взрывом шнурового заряда взрывчатого вещества, расположенного на продольной оси кольца.

В современном машиностроении наряду с традиционными свойствами конструкционных материалов (жесткость, прочность, твердость и так далее) все большее значение приобретают такие характеристики как динамическая прочность и способность рассеивания упругой энергии при колебаниях и ударах. В отличие от металлов и их сплавов композиционные материалы (КМ) обладают высокими диссипативными свойствами, а их логарифмический декремент затухания на порядок выше, чем у металлов, при сравнимом с металлами (а зачастую и более высоком) модуле упругости. Поэтому определение этих свойств КМ представляет значительный практический интерес.

Один из наиболее распространенных способов определения вязкоупругих и вибропоглощающих свойств материалов — метод свободных затухающих колебаний [1, 2], в котором, как правило, исследуются изгибные (реже крутильные) колебания свободно подвешенных или консольно заземленных стержней прямоугольного или круглого поперечного сечения. При этом на результаты измерений существенное влияние могут оказывать условия закрепления и возбуждения колебаний для свободно подвешенных и неоднородность напряженно-деформированного состояния для консольно заземленных образцов. Для однонаправленного композита логарифмический декремент затухания существенно зависит от концентрации армирующих волокон и типа связующего, а для комбинированного КМ — еще и от относительного содержания волокон различных типов. Изготовление длинных плоских образцов однонаправленного волокнистого композита для определения этих демпфирующих характеристик по свободным затухающим колебаниям консольно заземленного или свободно подвешенного образца представляет определенные технологические трудности. В настоящей работе показана возможность определения упругих и демпфирующих свойств однонаправленного стеклопластика и органоэластика по свободным затухающим колебаниям кольцевых образцов, нагруженных изнутри взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ).

Имеется множество работ [3–7], в которых кольцевые образцы использовались для исследования динамической прочности материала при высокоскоростном растяжении. Применение таких образцов позволяет создать одноосное однородное напряженно-деформированное состояние, которое невозможно получить в плоских образцах из-за волнового характера распространения нагрузки. Аналогично и в случае свободных колебаний применение кольцевых образцов позволяет получить состояние одноосного

растяжения — сжатия, которое нельзя создать в длинных плоских образцах из-за невозможности одновременного приложения начальной нагрузки ко всей поверхности образца. Кроме этого, в случае использования кольцевых образцов из волокнистых КМ, изготовленных намоткой с углом укладки волокна близким к нулю, композит будет однонаправленным, с высоким (до 70 %) содержанием армирующих волокон и однородным — в случае комбинированной силовой основы за счет одновременной намотки различных типов волокон в одну технологическую нить.

Эксперименты по внутреннему взрывному нагружению производились на образцах, вырезанных из цилиндрических оболочек, изготовленных кольцевой намоткой с нулевым углом укладки арматуры из КМ двух типов: стеклоэпоксида на основе стекловолокна ВМ и эпоксидного связующего ЭДТ-10 и органоэпоксида на основе органоэпоксида СВМ и того же связующего ЭДТ-10. В качестве тестовых испытывались также металлические кольцевые образцы из стали 30ХГСА (закалка до твердости HRC = 45–50) и дюралюминия Д16 (в состоянии поставки).

По результатам статических испытаний образцов методом жестких полудисков [8], модуль упругости в окружном направлении стеклоэпоксида и органоэпоксида составил $65,0 \pm 5$ и $116,0 \pm 5$ ГПа соответственно. Плотность материалов составляла: 2,03 и 1,32 г/см³. Для стали и дюралюминия эти же параметры равны: 210 и 72 ГПа и 7,8 и 2,7 г/см³ соответственно.

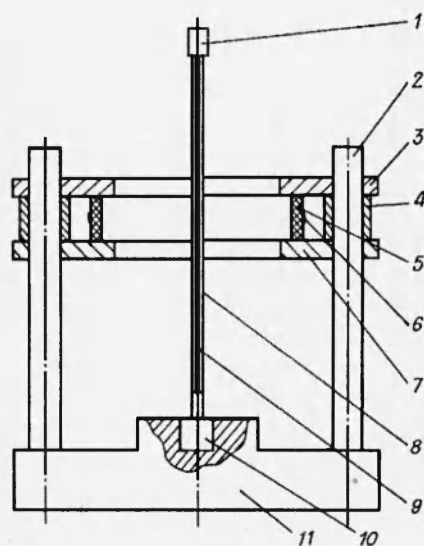


Рис. 1. Схема нагружения кольцевого образца.

Схема экспериментов приведена на рис. 1. Кольцевой образец с внутренним диаметром 100, толщиной стенки 2 и высотой 20 мм располагался между двумя фланцами 3 и 7, которые закреплялись на четырех шпильках 2, соосно установленных в основании 11. Свободное движение кольца 5 в процессе колебаний обеспечивалось втулками 4, высота которых на 0,1–0,2 мм превышала высоту образца. Нагружение создавалось продуктами взрыва шнура 9, размещенного на продольной оси образца. В качестве заряда использовался отрезок безоболочечного детонирующего шнура из пластифицированного гексогена диаметром 2 и длиной 200 мм. Отрезок шнура вставлялся в жесткую бумажную трубку 8, которая надевалась на центрирующую оправку 10, вставляемую в основание 11. Подрыв детонирующего шнура осуществлялся

с торца трубки при помощи низковольтного малогабаритного детонатора 1 (диаметр 6, высота 9 мм), дающего малое осколочное поле, через промежуточный заряд из насыпного подпрессованного гексогена массой 0,4–0,5 г. Нагружение образца в этом случае чисто импульсное, так как длительность импульса давления, который падал на стенку кольца, не превышала 2–3 мкс при величине периода собственных колебаний ≥ 35 –50 мкс.

Неоднородность нагружения, связанная с конечностью скорости распространения детонации по длине заряда, была также невелика: при скорости детонации шнура 7,5 км/с и высоте кольца 20 мм неодновременность

нагружения стенки образца по времени составляет менее 3 мкс и не вносит какой-либо заметной погрешности в процесс колебания. В целях уменьшения неоднородности нагружения возможно уменьшение высоты кольца до 8–12 мм: неодновременность нагружения в этом случае составит всего 1–1,5 мкс. Окружная деформация КО фиксировалась кольцевым спиральным тензодатчиком 6 из нихромовой проволоки марки ПЭНХ диаметром 0,1 мм, аналогичным используемым в [9, 10]. Датчики наклеивались на наружную поверхность образцов из КМ эпоксидной смолой марки ЭД-20 холодного отверждения с добавлением 20 % пластификатора (дибутилфталата) по массе, а на поверхность металлических образцов — клеем БФ-2 с последующим горячим отверждением. Использование таких датчиков позволяет фиксировать в процессе эксперимента осредненную окружную деформацию, что, с одной стороны, позволяет исключить вредное влияние возможного изгиба стенки, а с другой — определять окружную деформацию стенки кольца сразу по всей ее длине.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы свободных затухающих колебаний колец из композитов. В случае чисто радиальных колебаний осевая линия КО образует окружность с периодически меняющимся радиусом и все поперечные сечения кольца двигаются радиально без поворотов. Частота таких колебаний определяется по формуле, приведенной, например, в [11],

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где R — внутренний радиус кольца, E — модуль упругости материала кольца, ρ — плотность материала кольца.

Чтобы установить точность определения упругих характеристик материала, перед импульсным нагружением образец из органопластика нагружался статически жесткими полудисками и определялся модуль упругости материала именно этого образца. По этому значению модуля упругости по формуле (1) вычислялось «теоретическое» значение частоты свободных колебаний f_T , которое после импульсного нагружения сравнивалось с экспериментально определенным значением частоты свободных колебаний f_3 . Частота f_3 определялась по числу периодов колебаний образца с момента начала процесса колебаний до полного их затухания (только для композитов). Для образца из стеклопластика при расчете f_T величина модуля упругости $E_{ст}$ бралась средней по десяти образцам. Динамические испытания проводились с 4-мя образцами из стеклопластика и 3-мя из органопластика.

Результаты экспериментов приведены в таблице. Сравнение значений f_T и f_3 показывает, что при данном способе нагружения кольцо совершает свободные затухающие колебания чисто радиального типа со своей нижней собственной частотой. Процесс колебаний устойчивый и колебания высших форм не возбуждаются. Значения логарифмического декремента затухания δ_3 определялись по первым десяти и двадцати периодам колебаний. Для стали и дюралюминия значения δ сравниваются с данными из

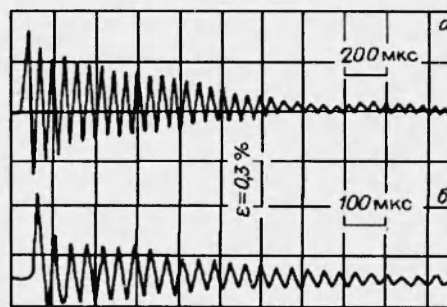


Рис. 2. Осциллограммы колебаний композитных образцов:

a — стеклопластик; b — органопластик; ϵ — окружная деформация стенки кольца.

Материал образца	f_T , Гц	f_s , Гц	Δ , %	δ_c	δ_s
Органопластик	26861	27143	1,04	—	0,194
Стеклопластик	18012	17021	5,5	—	0,094
Сталь 30ХГСА	16525	16000	3,17	0,001	0,002
Дюралюминий Д16	15813	15500	1,98	0,008–0,012	0,015

справочника [12] — δ_c . Следует отметить, что значение δ_s очень сильно зависит от уровня действующих напряжений для металлов и еще в большей степени для композитов. Чтобы построить функциональную зависимость величины декремента затухания от уровня напряжений, требуется провести анализ всего процесса затухания колебаний. Поэтому полученные значения δ_s ориентировочные. Для однонаправленного высокопрочного стеклопластика и органопластика точные справочные данные отсутствуют. Для низкопрочных стеклопластиков $\delta = 0,12-0,125$ (стеклотекстолит с модулем упругости $E = 12$ ГПа) и $\delta = 0,1$ (стеклотекстолит ВФТ-С, $E = 22$ ГПа) [12]. В работе [13] при исследовании поведения стеклопластиковых оболочек при взрывном нагружении изнутри, для стеклопластика с модулем упругости 33 ГПа в окружном направлении, величина декремента затухания составила 0,05. Следовательно, результаты настоящих экспериментов вполне удовлетворительно согласуются с данными других работ.

Предложенный способ исследования упругих колебаний может оказаться весьма удобным при обработке записи процесса деформации кольцевых образцов методами спектрального анализа, аналогично применяемым в [14, 15]. Отсутствие биений и суперпозиции высших частот в процессе колебаний колец, а также близкий к гармоническому характер затухающих колебаний дают возможность получить спектр с узким, ярко выраженным максимумом, соответствующим основной частоте колебаний.

Таким образом, предлагаемый способ нагружения кольцевых образцов и регистрации окружной деформации в процессе колебаний позволяет создать достаточно точный метод определения упругих и демпфирующих свойств композиционных конструкционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Писаренко Г. С., Матвеев В. В., Яковлев А. П. Методы определения характеристик демпфирования колебаний упругих систем. Киев: Наук. думка, 1976.
2. Пелех Б. Л., Саляк Б. И. Экспериментальные методы исследования динамических свойств композиционных структур. Киев: Наук. думка, 1990.
3. Hoggatt C. R., Recht R. F. Stress-Strain Data Obtained at High Rates Using an Expanding Ring // Exp. Mech. 1969. V. 9, N 10. P. 441–448.
4. Форрестол М., Уоллинг Г. Осесимметричная пластическая деформация колец при действии кратковременных импульсов давления // Ракетная техника и космонавтика. 1972. Т. 10, № 10. С. 142–144.
5. Рыжанский В. А., Минеев В. Н., Цыпкин В. И. и др. Экспериментальное исследование взрывного расширения тонких колец из отожженного алюминиевого сплава // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 1. С. 120–124.
6. Клименко В. Г., Борисевич В. К., Колодяжный А. В. Устройство для реализации однородного одноосного НДС цилиндрического кольца в процессе взрывного растяжения // Самолетостроение. Техника воздушного флота. Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1978. Вып. 44. С. 102–106.

7. Daniel I. M., LaBedz R. H., Liber T. New Method for Testing Composites at Very High Strain Rates // Exp. Mech. 1981. V. 21, N 2. P. 71-77.
8. Тарнопольский Ю. М., Киндиг Т. Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Химия, 1975.
9. Dewhurst P., Hawkyard J. B., Johnson W. A Theoretical and Experimental Investigation of Dynamic Circular Cylindrical Expansions in Metals // J. Mech. and Phys. of Solids. 1974. V. 22, N 4. P. 267-283.
10. Шитов А. Т., Минеев В. Н., Клещевников О. А. и др. Проволочный датчик для непрерывной регистрации больших деформаций при динамическом нагружении конструкций // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 2. С. 304-307.
11. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М.: Физматгиз, 1959.
12. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Киев: Наук. думка, 1971.
13. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Иванов А. Г. и др. Особенности динамического деформирования и разрушения цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. 1983. № 1. С. 90-94.
14. Володина Л. В., Зотов Е. В., Красовский Г. Б. и др. Динамика вязкоупругих сферических оболочек при внутреннем взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 4. С. 91-95.
15. Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Горшков Н. Н. Влияние окружающей заряд ВВ среды на реакцию оболочки взрывной камеры // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 2. С. 89-95.

*Поступила в редакцию 10/VI 1994 г.,
в окончательном варианте — 5/IV 1995 г.*
