

УДК 624.074.4+539.3

ДЕМПФИРУЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НАМОТКОЙ

А. Г. Демешкин, М. Е. Козеко, В. М. Корнев, В. Д. Кургузов

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

Проведены эксперименты по внутреннему взрывному (импульсному) нагружению композитных колец, изготовленных намоткой. Специально подобранным нагружением возбуждались совместные осесимметричные и изгибные колебания. На основе анализа экспериментальных результатов получены осредненные демпфирующие характеристики осесимметричных движений и собственные частоты осесимметричных и изгибных колебаний стекло-, органо- и углепластиковых колец.

В отличие от металлов и их сплавов композитные материалы обладают лучшими диссипативными свойствами, а их логарифмический декремент затухания на порядок выше, чем у металлов. Имеющиеся в литературе экспериментальные данные [1–3] по демпфирующей способности композитных материалов и их логарифмическому декременту существенно различаются. Это объясняется использованием различных методик определения диссипативных свойств и материалов, отличающихся модулем упругости, укладкой армирующих волокон, их объемным содержанием и т. п. В данной работе приведены результаты экспериментов по импульсному нагружению стекло-, органо- и углепластиковых колец, изготовленных намоткой с углом укладки волокон, близким к нулю. В качестве армирующих волокон использовались стекловолокно марки ВМ, органоволокно марки СВМ и ткань с ортогональным плетением из углеволокон.

На первом этапе экспериментов были проведены статические испытания колец на разрывной машине с помощью двух жестких полудисков [4]. В табл. 1 приведены осредненные результаты статических испытаний (испытывалось по 10 образцов каждого типа). Испытываемые кольца имели следующие размеры: внутренний диаметр $D = 100$ мм, высота поперечного сечения 18–20 мм, толщина $h = 1 \div 2$ мм. В табл. 1 использованы следующие обозначения: E , ρ — модуль упругости и плотность материала; σ_{\max} , ε_{\max} — предельные напряжения и деформации.

Один из наиболее распространенных способов определения вязкоупругих и вибропоглощающих свойств материалов основан на методе свободных затухающих колебаний [1, 3], в котором, как правило, исследуются изгибные колебания свободно подвешенных или консольно зашпеленных стержней. При этом на результаты измерений существенное влияние могут оказывать условия закрепления. Изготовление длинных образцов однона-

Таблица 1

Композитный материал	E , ГПа	σ_{\max} , ГПа	ε_{\max} , %	ρ , г/см ³
Стеклопластик	$63,765 \pm 2,256$	$1,511 \pm 0,108$	$2,40 \pm 0,20$	$2,03 \pm 0,05$
Органопластик	$113,698 \pm 10,791$	$1,972 \pm 0,098$	$1,74 \pm 0,16$	$1,03 \pm 0,03$
Углепластик	$108,695 \pm 9,320$	$0,765 \pm 0,118$	$0,70 \pm 0,08$	$1,43 \pm 0,03$

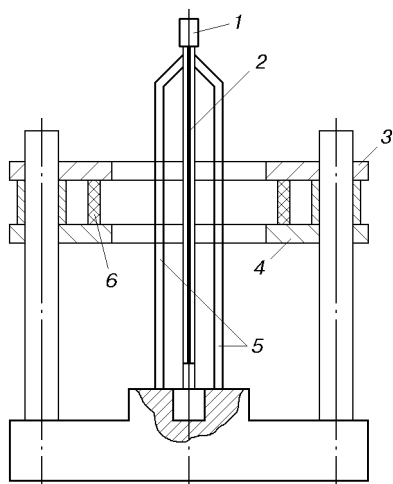


Рис. 1. Схема нагружения кольцевого образца:
1 — электродетонатор; 2 — шнуровой заряд; 3, 4 — фланцы; 5 — детонационные шнуры; 6 — кольцевой образец

правленного волокнистого композита для определения демпфирующих характеристик по свободным затухающим колебаниям консольно заземленного или свободно подвешенного образца связано с определенными технологическими трудностями. В настоящей работе показана возможность определения демпфирующих свойств свободно затухающих осесимметричных и изгибных колебаний кольцевых образцов, нагруженных изнутри взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ), что позволяет создать как одноосное однородное, так и неоднородное напряженно-деформированные состояния, первое из которых невозможно получить в плоских образцах из-за волнового характера распространения нагрузки.

Схема эксперимента приведена на рис. 1 и почти идентична схеме в [5]. Кольцевые образцы помещались между фланцами, расстояние между которыми на 0,1–0,2 мм превышало высоту образца. Металлическая сборка с образцом помещалась во взрывную камеру объемом 2 м³. Вакуум в камере не создавался. Нагружение осуществлялось продуктами взрыва шнурового заряда ВВ, размещенного на продольной оси образца. В качестве заряда использовался отрезок безоболочечного детонирующего шнура из пластифицированного гексогена диаметром 2–4 мм и длиной 200 мм. Отрезок шнура вставлялся в жесткую бумажную трубку, которая располагалась строго по оси кольца. Для возбуждения совместных осесимметричных и изгибных движений в кольце использовался одновременный подрыв двух или трех детонационных шнуров. Подрыв шнура осуществлялся при помощи низковольтного малогабаритного электродетонатора через промежуточный заряд из насыпного подпрессованного гексогена массой 0,4–0,5 г. Окружная деформация фиксировалась кольцевым тензодатчиком из нихромовой проволоки, аналогичным используемым в статических испытаниях.

В процессе нагружения образец совершает свободные затухающие колебания, по которым определяется экспериментальная частота этих колебаний f_e . На рис. 2 приведены

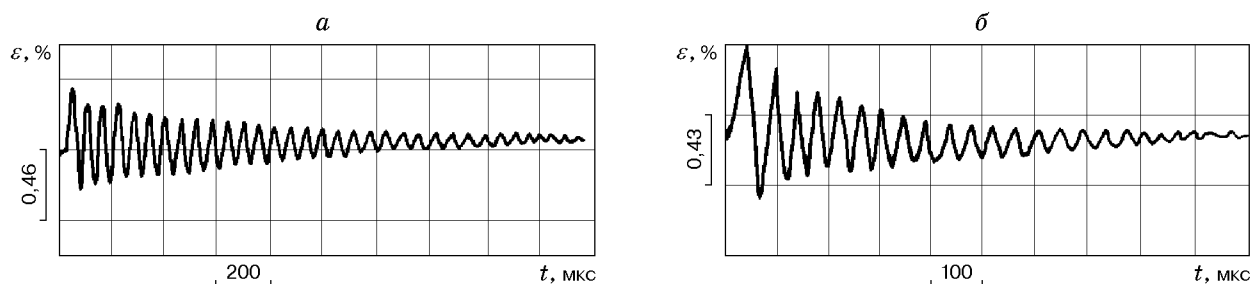


Рис. 2. Оциллограммы свободных затухающих колебаний композитных колец:
а — стеклопластик, б — углепластик

Таблица 2

Композитный материал	δ				δ_m
	$k = 5$	$k = 10$	$k = 15$	$k = 20$	
Стеклопластик	0,143	0,124	0,132	0,130	0,132
Органопластик	0,185	0,158	0,147	0,140	0,153
Углепластик	0,203	0,181	0,157	—	0,180

типичные осциллограммы свободных затухающих колебаний колец для двух материалов. Теоретическая частота f_t этих колебаний может быть определена по формуле

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

где R — средний радиус кольца.

В качестве демпфирующих свойств материала обычно используется логарифмический декремент колебаний как характеристика, легко определяемая по виброграмме свободных колебаний образца. Если логарифмический декремент δ не зависит от абсолютной величины амплитуды, то его можно представить в виде [3]

$$\delta = \frac{1}{k} \ln \frac{a_i}{a_{i+k}},$$

где a_i и a_{i+k} — амплитуды колебаний в начале и конце интервала, состоящего из k циклов.

В предложенной методике к факторам, существенно влияющим на декремент затухания, следует отнести трение торцевой части кольца о фланец (масса образцов менялась в пределах 15–30 г), а также сопротивление окружающей среды и продуктов взрыва. Влияние перечисленных факторов в данной работе не учитывалось. Влиянием продуктов взрыва на процесс колебаний можно пренебречь из-за малой навески ВВ. При наличии воздушной среды во взрывной камере получаемые осредненные демпфирующие характеристики являются оценками сверху демпфирующих характеристик материала в вакууме.

Проверка зависимости логарифмического декремента затухания δ от амплитуды колебаний проводилась по осциллограммам, две из которых приведены на рис. 2. В табл. 2 приведены значения декремента затухания δ в зависимости от числа периодов k колебаний. Начало интервалов, по которым проводилось осреднение, совпадало с началом колебаний кольца.

Из анализа полученных данных следует зависимость декремента затухания от интервала, по которому он рассчитывался: с увеличением интервала декремент затухания уменьшается. Однако можно говорить о некотором среднем значении декремента затухания δ_m и погрешности этого значения в пределах 10–30 %.

Значение логарифмического декремента зависит от уровня действующих напряжений. Для определения этой зависимости в экспериментах варьировалась толщина колец, а также толщина детонирующего шнура. По значениям модулей упругости, полученным при статических испытаниях, определялись теоретическая частота f_t по формуле (1) и экспериментальная частота f_e по осциллограммам. Результаты осредненных значений декрементов затухания для трех типов композитных колец и различных уровней нагружения приведены в табл. 3. Для стекло- и органопластиковых колец средние значения рассчитаны по 20 периодам колебаний, для углепластиковых — по 15 (ε_{\max} — максимальное значение деформации в первом цикле колебаний кольца, $\sigma_{\max} = E\varepsilon_{\max}$ — максимальное значение напряжения).

Таблица 3

Номер образца	f_t , Гц	f_e , Гц	δ	ε_{\max} , %	σ_{\max} , МПа
Стеклопластик					
1	17 458	15 535	0,055	0,29	182,466
2	17 496	16 686	0,061	0,36	229,554
3	17 496	17 574	0,117	0,40	255,060
4	17 496	16 914	0,102	0,39	280,566
5	17 496	17 610	0,116	0,45	287,433
6	17 496	16 925	0,110	0,52	331,578
7	17 496	16 458	0,198	0,64	417,906
8	17 496	16 241	0,162	0,69	433,602
Органопластик					
1	28 920	21 764	0,123	0,31	353,160
2	28 920	21 893	0,086	0,33	375,723
3	28 821	22 152	0,168	0,38	432,621
4	29 361	26 871	0,160	0,44	500,310
5	29 347	24 045	0,160	0,55	625,878
6	29 361	26 365	0,233	0,68	774,009
Углепластик					
1	—	—	0,093	0,24	258,984
2	26 824	23 213	0,111	0,41	437,526
3	26 824	23 217	0,150	0,56	474,804
4	26 824	23 491	0,170	0,65	706,320
5	26 990	23 381	0,265	0,72	774,990
6	26 824	24 822	0,210	0,82	863,280
7	27 000	24 242	0,330	0,84	906,444

Зависимость декремента затухания δ от величины приложенной нагрузки приведена на рис. 3.

Проведенные эксперименты по взрывному нагружению композитных колец позволяют сделать следующие выводы: 1) логарифмический декремент затухания в композитах существенно зависит от величины приложенной нагрузки (возрастает с увеличением нагрузки); 2) экспериментальная частота колебаний колец ниже теоретической для всех испытанных композитов (в среднем для стеклопластика — на 4%, для углепластика — на 9%, для органопластика — на 16%). Одно из возможных объяснений этого различия связано с неучетом присоединенной массы и сопротивления окружающей среды, а также сухого трения образца о фланец (все экспериментальные частоты меньше теоретических).

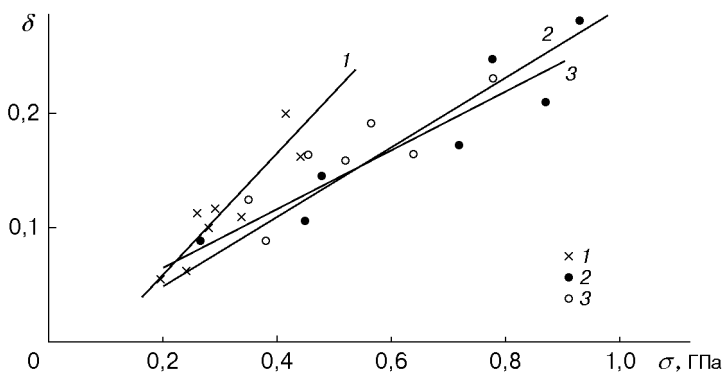


Рис. 3. Зависимость декремента затухания от величины приложенной нагрузки:
 1 — стеклопластик, 2 — углепластик,
 3 — органопластик

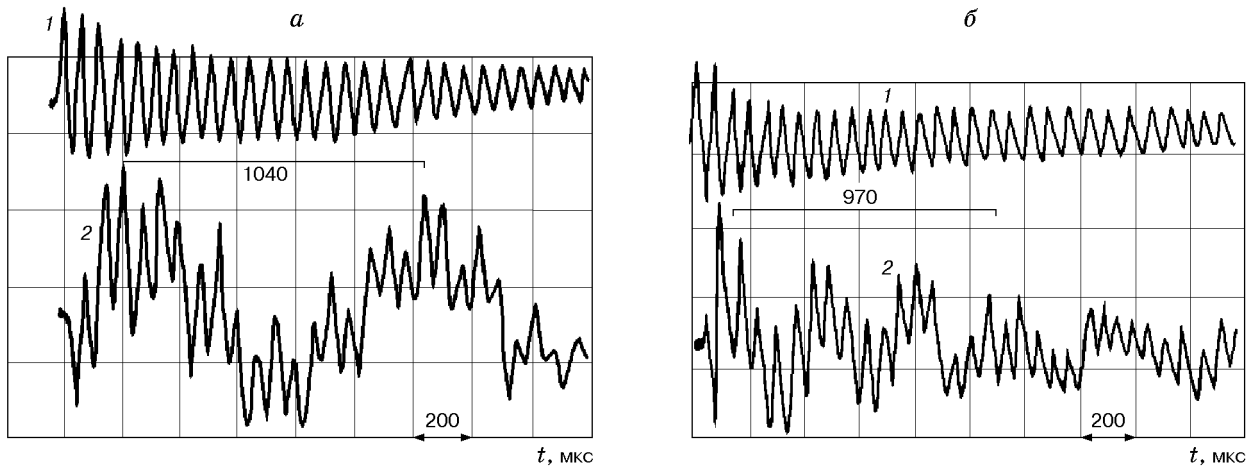


Рис. 4. Осциллограммы осесимметричных и изгибных колебаний кольца из стеклопластика: 1 — осесимметричная форма, 2 — изгибная ($a - n = 2$, $b - n = 3$)

Кроме осесимметричных движений колец изучены также изгибные формы и получены оценки частот изгибных колебаний композитных колец. Приближенная формула для подсчета теоретических частот f_{nt} изгибных колебаний имеет вид [6, с. 349, 350]

$$f_{nt} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{R} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{h}{R} \frac{n(n^2 - 1)}{\sqrt{12\sqrt{n^2 + 1}}}}, \quad n = 2, 3, \dots \quad (2)$$

Следует отметить, что выражение (2) зависит от параметра тонкостенности h/R и номера соответствующей формы колебаний n . Соотношение (2) с точностью до величин высшего порядка малости для достаточно тонких колец совпадает с частотными соотношениями из [7].

В экспериментах в кольце одновременно возбуждались осесимметричные и изгибные колебания путем подрыва двух или трех детонационных шнуров (см. рис. 1), которые располагались симметрично относительно центра кольца на равном расстоянии друг от друга. Процесс изгибных колебаний записывался двумя фольговыми датчиками, находящимися на кольце напротив детонационных шнуров. Для осреднения величины изгибных деформаций тензодатчики соединялись последовательно.

На рис. 4 приведены осциллограммы колебаний кольца. Осциллограммы 1 соответствуют осесимметричным колебаниям, осциллограммы 2 — изгибным колебаниям. По приведенным осциллограммам можно приблизительно определить частоту изгибных колебаний, а также установить, что осесимметричные движения кольца накладываются на изгибные движения; частоты осесимметричных f_e и изгибных f_{2e} ($n = 2$), f_{3e} ($n = 3$) форм колебаний существенно различаются, а высшие частоты соответствующих гармоник изгибных колебаний практически совпадают с частотами осесимметричных колебаний.

Экспериментальные значения частот изгибных колебаний для двух типов композитных колец удовлетворительно соответствуют расчетам по формуле (2). Для кольца из стеклопластика ($d = 100,65$ мм, $D = 109,70$ мм) изгибная частота, рассчитанная по формуле (2) при $n = 2$, равна $f_{2t} = 1046$, в эксперименте частота определялась по первому периоду колебаний и равна $f_{2e} \approx 1000$ (рис. 4). Для того же кольца изгибная частота, рассчитанная по формуле (2) при $n = 3$, равна $f_{3t} = 3390$, а экспериментальная, определенная по трем первым периодам колебаний, равна $f_{3e} \approx 3100$ (рис. 4).

Из анализа осесимметричных и изгибных колебаний (рис. 4) можно сделать следующие выводы: 1) для тонкостенных колец ($h/R \ll 1$) частоты осесимметричных и изгибных колебаний отличаются на порядок; 2) декремент затухания изгибных колебаний существенно больше декремента затухания осесимметричных колебаний.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что нагружение кольцевых образцов зарядом ВВ изнутри позволяет достаточно легко получить как демпфирующие, так и частотные характеристики по различным формам колебаний. Демпфирующие характеристики зависят от интенсивности нагружения: логарифмический декремент затухания возрастает с увеличением уровня нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бондаренко А. А., Галака П. И., Носаченко А. М.** Затухание колебаний в стеклопластиковых цилиндрических оболочках // Прикл. механика. 1969. Т. 5, № 9. С. 121–124.
2. **Пелех Б. Л., Саяк Б. И.** Экспериментальные методы исследования динамических свойств композиционных структур. Киев: Наук. думка, 1990.
3. **Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.** Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Киев: Наук. думка, 1971.
4. **Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я.** Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Химия, 1975.
5. **Макаров Г. Е.** Экспериментальное исследование колебаний кольцевых образцов при внутреннем взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 6. С. 125–129.
6. **Прочность. Устойчивость. Колебания.** М.: Машиностроение, 1968. Т. 3.
7. **Корнев В. М., Макаров Г. Е.** Потеря устойчивости упругих композитных колец при внутреннем импульсном нагружении // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 5. С. 185–194.

*Поступила в редакцию 8/II 2000 г.,
в окончательном варианте — 10/V 2000 г.*
