

Б. Н. Ковешников, Н. Д. Степаненко

### ВЛИЯНИЕ ТИПА АРМИРОВАНИЯ И ЧАСТОТЫ НАГРУЖЕНИЯ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

В настоящее время широко используется ряд методов экспериментального определения динамического модуля упругости стеклопластиков по частоте собственных поперечных колебаний стержней [1, 2, 3].

На рис. 1 представлена одна из возможных схем определения модуля упругости стеклопластиков. Определение модуля упругости в этой схеме производится по частоте поперечных колебаний стержней, свободно подвешиваемых на струнах диаметром 0,1—0,2 мм в узловых линиях первой и более высоких форм изгибных колебаний. Возбуждение резонансных колебаний осуществляется модулированной струей сжатого воздуха, истекающего из сопла. Пульсирующая струя воздуха не вносит искажений в упруго-массовые характеристики колеблющегося образца и обеспечивает его охлаждение. Блок-схема установки (рис. 1) описана в работе [4].

Расчет модуля упругости производится по формуле

$$E = \frac{48\pi^2 \rho}{\kappa^4} \cdot \frac{l^4}{h^2} \cdot f^2, \quad (1)$$

где  $l$  и  $h$  — длина и толщина стержня;  $f$  — собственная частота колебаний;  $\kappa$  — корень характеристического уравнения частот;  $\rho$  — плотность материала.

Определение модуля по формуле (1) основано на предположении, что инерция вращения, а также сдвиговые деформации, возникающие при поперечном изгибе, и «побочные» сдвиги, вызываемые нормальными напряжениями при изгибе стержней, ось которых не совпадает с главными направлениями армирования, не оказывают сколь-нибудь существенного влияния на частоту.

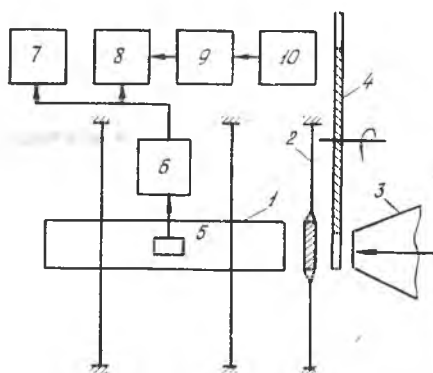


Рис. 1. Блок-схема установки: 1 — образец; 2 — струны; 3 — воздушное сопло; 4 — вращающийся профилированный диск; 5 — тензодатчик; 6 — тензоусилитель; 7 — прибор контроля деформаций; 8 — электронный осциллограф; 9 — звуковой генератор; 10 — частотомер

Инерцией вращения можно пренебречь [5], роль же сдвиговых деформаций при поперечном изгибе стеклопластиков зависит от отношения  $\frac{l}{h}$  [6]. С целью исключения или значительного уменьшения влияния сдвигов эксперименты проводятся только по первым двум-трем формам изгибных колебаний, при этом  $\frac{l}{h} \geq 45$ . Увеличение частоты по первой изгибной форме достигается подрезкой образцов при условии, что  $\frac{l}{h} > 25$ . Модуль упругости определяется при низких относительных деформациях  $\epsilon \leq 50 \cdot 10^{-5}$ .

При действии нормальных напряжений под углом к оси структурной симметрии материала могут возникать «побочные» сдвиговые деформации, которые зависят от величины этого угла, степени анизотропии упругих свойств материала, условий закрепления и геометрических размеров (отношения длины к ширине  $\frac{l}{b}$  и длины к толщине  $\frac{l}{h}$ ) стержней. Угловые деформации при изгибе стержней со свободными концами, ось которых не совпадает с осью симметрии материала, не затруднены почти по всей длине стержней, так как их концы свободны, а струны ограничивают лишь вращение вокруг оси и перемещение стержня как твердого тела.

Насколько действительные условия эксперимента приближаются к условиям свободного поперечного изгиба, когда степень деформаций отсутствует, можно окончательно ответить только экспериментальным путем. Для этого нужно знать распределение относительных деформаций по ширине в различных сечениях стержней. Такие опыты проводились на образцах, изготовленных из стеклопластиков ЭДТ-10, ЭТФ-ВМ, 27—63В «С», ЭДЦ-В. Не излагая подробно результаты экспериментов отметим, что для исследуемых материалов различных структур армирования распределение относительных деформаций вдоль оси образцов ( $\frac{l}{h} > 20$ ,  $\frac{l}{b} > 2$ ), полученное экспериментальным путем по первой изгибной форме, хорошо согласуется с расчетным распределением деформаций, полученным без учета сдвиговых деформаций по известным соотношениям теории колебаний [5]. Распределение продольных деформаций по ширине стержней в наиболее напряженном среднем сечении и в местах подвески также близко к расчетному. Установлено, что при отношении  $\frac{l}{b} = 3$  наибольшая неравномерность деформаций не превышает 5%, а при  $\frac{l}{b} > 4$  отличие между деформациями на краях и посередине образца не более 1—2%. Это свидетельствует о том, что при соотношении геометрических разме-

ров образцов  $\frac{l}{b} > 4$  и  $\frac{l}{h} > 20$  величины модуля упругости и коэффициента Пуассона определяются в условиях, максимально приближенных к расчетной схеме свободного поперечного изгиба. Чтобы исключить влияние на результаты опытов краевого эффекта, ширина образцов принята  $b=25$  мм. Экспериментальное изучение влияния ширины образцов на результаты определения модуля упругости и логарифмического декремента колебаний показало, что эти характеристики не зависят от ширины образцов при  $b > 20$  мм.

По изложенной методике изучено влияние типа армирования и частоты циклического нагружения на упругие свойства стеклопластиков ЭДТ-10 и ЭТФ-ВМ. В качестве наполнителя в этих материалах использовалась обычная кордно-жгутовая ткань ТС-8/3-250 (ЭДТ-10 с симметричной укладкой основы под углами 0, 30, 45, 60, 75 и 90° к оси образцов) и высокомодульная кордно-жгутовая ткань Т-28 (ВМ) — 78 (образцы из материалов ЭДТ-10 и ЭТФ-ВМ с укладкой основы под углами 0, 15, 30, 45, 60, 75 и 90° к оси; образцы из ЭТФ-ВМ с симметричной укладкой основы под углами 0, 15, 30, 45, 60, 75 и 90° к оси).

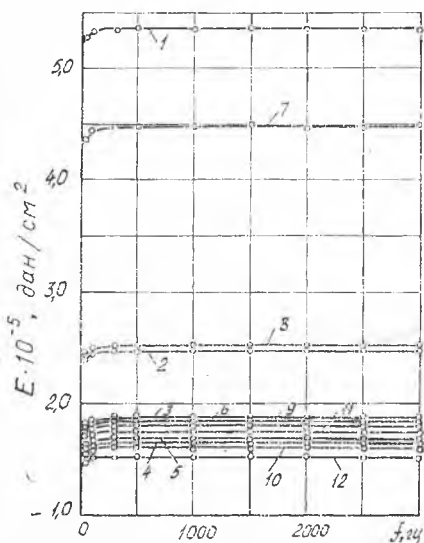


Рис. 2. Влияние частоты на динамический модуль упругости стеклопластика ЭДТ-10:

1—6 — наполнитель Т-28 (ВМ) — 78, укладка основы под углами 0, 30, 45, 60, 75, 90° к оси образцов; 7—12 — наполнитель ТС-8/3-250, симметричная укладка основы под углами 0, 30, 45, 60, 75 и 90° к оси образцов



Рис. 3. Влияние частоты на динамический модуль упругости стеклопластика ЭТФ-ВМ:

1—7 — укладка основы под углами к оси образцов 0, 15, 30, 45, 60, 75 и 90° соответственно; 8—14 — симметричная укладка основы под углами к оси образцов 0, 15, 30, 45, 60, 75 и 90° соответственно

Таблица

Материал	Угол укладки основы $\varphi$	«Истинный» модуль упругости $E_{ист} \cdot 10^{-5}$ дан $\frac{да}{см^2}$	Статический модуль упругости $E_{ст}^* \cdot 10^{-5}$ дан $\frac{да}{см^2}$	Истинная частота $f_{и}$ (Гц)	«Дефект» модуля $\Delta E\%$
ЭДГ-10 (наполнитель — высоко- модульная КЖТ) Основа уложена под углом к оси образцов	0	5,357	5,18	705	3,41
	30	2,459	2,36	555	4,19
	45	1,848	1,74	472	6,2
	60	1,628	1,55	452	5,03
	75	1,659	1,59	445	4,33
	90	1,812	1,74	410	4,13
ЭДТ-10 (наполнитель — обычная КЖТ) Симметричная укладка основы под углом к оси образцов	0	4,46	4,31	630	3,48
	30	2,52	2,41	565	4,56
	45	1,83	1,73	400	5,78
	60	1,618	1,55	383	4,38
	75	1,74	1,67	395	4,19
	90	1,51	1,46	310	3,42
ЭТФ-ВМ* Основа уложена под углом к оси образцов	0	4,70	4,54	680	3,5
	15	3,68	3,535	570	4,1
	30	2,446	2,336	475	4,5
	45	1,85	1,74	405	6,1
	60	1,64	1,562	370	5,0
	75	1,61	1,54	362	4,6
	90	1,625	1,56	390	4,2
ЭТФ-ВМ Симметричная укладка основы под углом к оси образцов	0	4,70	4,53	655	3,75
	15	4,561	4,38	610	4,0
	30	3,765	3,59	510	4,7
	45	2,166	2,04	445	5,9
	60	2,103	2,00	416	5,2
	75	2,046	1,956	420	4,6
	90	1,961	1,88	413	4,1

\* Содержание обязующего ниже оптимального на 3÷5%.

На рис. 2, 3 представлены графики изменения динамического модуля упругости в зависимости от частоты. Экспериментальные результаты получены в диапазоне частот 50÷3000 гц, при этом опыты проводились на одних и тех же образцах, а изменение частоты достигалось изменением длины образцов. Число образцов для каждого варианта укладки не менее 7.

Опытные данные (рис. 2, 3) удовлетворительно аппроксимируются эмпирическим соотношением [3]

$$E = E_{\text{ист}} - (E_{\text{ист}} - E_{\text{ст}}) e^{-bf}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{ист}}$  и  $E_{\text{ст}}$  — «истинный» и статический модули упругости;  $b$  — коэффициент, подбираемый экспериментально. Значение этого коэффициента принято равным  $b = 3,75^{-3}$ .

Частота колебаний  $f_n$ , на которой достигается «истинный» модуль упругости, и его экспериментальные значения приведены в таблице. Там же имеются значения статического модуля упругости, полученные экстраполяцией кривых  $E = E(f)$  на частоты  $f < 50$  гц и величины «дефекта» модуля упругости  $\Delta E \frac{E_{\text{ист}} - E_{\text{ст}}}{E_{\text{ст}}} \%$  для различных вариантов армирования образцов. Из представленных данных следует, что частотная зависимость модуля упругости изученных материалов выражена очень слабо.

Таким образом, влияние частотной зависимости модуля упругости исследуемых стеклопластиков на спектр собственных частот колебаний тонкостенных элементов конструкций, изготовляемых из этих материалов, мало и имеет место лишь для низших форм колебаний в диапазоне частот до 700 гц.

Данные, приведенные на рис. 2, 3 и в таблице, показывают, что динамический модуль существенно зависит от ориентации армирующих элементов относительно напряжений, действующих при колебаниях.

Изменение динамических упругих констант ортотропного упругого тела в зависимости от направления выражается общеизвестными зависимостями преобразования компонент четвертой валентности [7].

Если за исходные взять значения динамических модулей  $E_0$ ,  $E_{45}$ ,  $E_{90}$  и коэффициента Пуассона  $\mu_0$ , которые можно просто и с удовлетворительной точностью определить, то эти зависимости упростятся:

$$E_\varphi = \frac{E_0}{\cos^4 \varphi + b_0 \sin^2 2\varphi + c_0 \sin^4 \varphi}; \quad (3)$$

$$\mu_\varphi = \frac{\mu_0 + 2(b_0 - n_0) \sin^2 2\varphi}{\cos^4 \varphi + b_0 \sin^2 2\varphi + c_0 \sin^4 \varphi}; \quad (4)$$

$$G_\varphi = \frac{E_0}{2\mu_0 + 4b_0 - 4(2b_0 - n_0) \sin^2 2\varphi}; \quad (5)$$

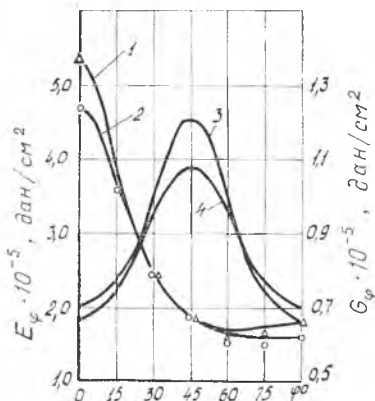


Рис. 4. Изменение модулей упругости и сдвига стеклопластиков при нагружении под углами к главным направлениям упругости: 1 и 2 — модули упругости материалов ЭДТ-10 и ЭТФ-ВМ соответственно, 3 и 4 — модули сдвига материалов ЭДТ-10 и ЭТФ-ВМ соответственно

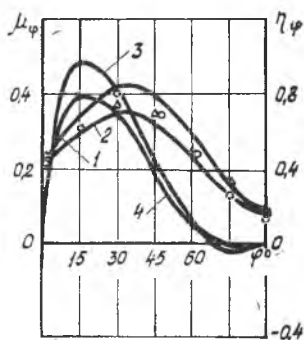


Рис. 5. Изменение коэффициентов Пуассона и взаимного влияния стеклопластиков при нагружении под углами к главным направлениям упругости:

1 и 2 — коэффициент Пуассона материалов ЭДТ-10 и ЭТФ-ВМ соответственно, 3 и 4 — коэффициент взаимного влияния материалов ЭДТ-10 и ЭТФ-ВМ соответственно

$$\eta_{\varphi} = \frac{c_0 - 1 + 4(2b_0 - n_0) \cos 2\varphi}{2(\cos^4 \varphi + b_0 \sin^2 2\varphi + c_0 \sin^4 \varphi)} \sin 2\varphi, \quad (6)$$

где

$$c_0 = \frac{E_0}{E_{90}}, \quad n_0 = \frac{E_0}{E_{45}}, \quad b_0 = n_0 - \frac{c_0 + 1}{4}.$$

Уравнения (3) и (4) приведены в работе [8]. На основе экспериментальных точек  $E_0$ ,  $E_{45}$ ,  $E_{90}$ ,  $\mu_0$  по уравнениям (3) — (6) построены теоретические кривые изменения констант упругости стеклопластиков ЭДТ-10 и ЭТФ-ВМ (рис. 4, 5) различных вариантов армирования. Расчетные значения модуля упругости и коэффициента Пуассона удовлетворительно согласуются с экспериментальными точками. Анизотропия динамических упругих свойств стеклопластиков оказывает большое влияние на спектр собственных частот колебаний элементов конструкций. Управляя упругими свойствами материала в конструкции представляется возможным без изменения геометрических размеров и граничных условий производить частотную отстройку от резонансных колебаний по опасным формам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лексашев Ю. Ф. Применение пьезодатчиков при определении динамического модуля продольной упругости резонансным методом. «Заводская лаборатория», 1962, № 6.

2. Попов В. Д., Сборовский А. К., Шавров Ю. Н. Демпфирующие характеристики стеклопластиков, используемых в судостроении», сб. «Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем», АН УССР, Киев, 1963.
3. Чернышев В. М. Методика определения динамических модулей упругости пластмасс. «Заводская лаборатория», 1962, № 4.
4. Иванов В. П., Степаненко Н. Д., Чураев Р. В. Некоторые вопросы вибрационных испытаний стеклопластиковых лопаток компрессоров. Труды КуАИ, вып. 36, Куйбышев, 1969.
5. Кузьменко В. А. Звуковые и ультразвуковые колебания при динамических испытаниях материалов, АН УССР, Киев, 1963.
6. Тарнопольский Ю. М., Скудра А. М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков, «Зинатне», Рига, 1966.
7. Рабинович А. Л. Об упругих постоянных и прочности анизотропных материалов, труды ЦАГИ, 1946, № 582.
8. Ашкенazi Е. К. Анизотропия механических свойств некоторых стеклопластиков, ЛДНТП, Л., 1961.

**А. В. Карпов**

#### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАНИЙ В СТЕКЛОПЛАСТИКЕ СТЭК-45 ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ЦИКЛЕ НАГРУЖЕНИЯ**

В большинстве случаев эксперименты по исследованию рассеяния энергии колебаний в конструкционных материалах проводятся для образцов, находящихся в условиях чистого изгиба. Однако полученные результаты трудно использовать при оценке демпфирования колебаний деталей, находящихся в условиях сложного напряженного состояния.

В лаборатории кафедры 203 МАИ создана установка, позволяющая, в частности, исследовать рассеяние энергии колебаний при поперечных колебаниях образцов, дополнительно растягиваемых продольной силой. Кроме того, установка позволяет также вести исследование в условиях повышенных температур и уменьшенного аэродинамического демпфирования.

Установка (рис. 1) состоит из массивной плиты 1 со стойками 2, на которых укреплена балка 3. К балке на нитях 4 подвешен за захваты 5 исследуемый образец 6. Частота колебаний системы изменяется с помощью сменных противовесов 7, имеющих различные моменты инерции. Возбуждение колебаний на образце осуществляется с помощью электромагнитов 8, установленных по обе стороны от сменных противовесов. Спираль 13, расположенная сверху и снизу от образца, нагревает его до заданной температуры.

Форма и размер спирали были подобраны с учетом равномерного прогрева образца. Измерение температуры образцов производится термонарами, которые установлены в специальных гнездах экспериментального образца.