

П. М. ХАЧАТРЯН, Я. Н. ЦУКЕРМАН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
РЕЗИН ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

1. В настоящее время не существует стандартной методики определения динамического модуля упругости и показателя затухания волн напряжений в резинах при импульсных высокочастотных воздействиях. Однако, при использовании резин в качестве модельных материалов при исследованиях сейсмостойкости сооружений является необходимым знание характеристик модельного материала [8, 10]. Сильная зависимость свойств таких вязкоупругих материалов, как резины, от частоты воздействия известна давно [11].

Методика исследования динамических свойств резины, предлагаемая в работе, позволила определить характеристики ряда образцов. Для этого использован метод динамической фотоупругости [5, 11] и метод ультразвукового исследования [1, 2]. Метод динамической фотоупругости позволяет, в частности, с большой степенью точности определять напряжения, возникающие в стержнях, изготовленных из двулучепреломляющих материалов, при динамических нагрузках. Причем можно видеть процесс распространения волн во времени. Метод ультразвукового исследования позволяет без помех со стороны ограничивающих поверхностей и т. п. приводить многие исследования, в особенности измерения скорости распространения звуковых волн и определение упругих постоянных твердых тел.

А. Исследование динамических характеристик резин
поляризационно-оптическим методом

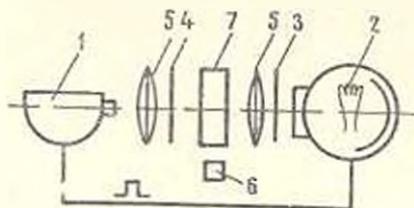
2. Образцы для исследования взяты в виде составных стержней. Стержни склеивались эпоксидным клеем холодного отверждения из трех частей: двух стерженьков длиной по 60 мм, изготовленных из прозрачного двулучепреломляющего эпоксидного компаунда ЭК (смола ЭД-6 + малиновый ангидрид), и вклеенного между ними слоя длиной L из исследуемой резины. Поперечное сечение стержня было квадратным с размерами 6 × 6 мм. Образцы нагружались взрывом ВВ (0,02 — 0,05 г), расположенной на торце стержня. Цель фоторегистратора располагалась вдоль образца и захватывала все три части составного стержня. Таким образом, из сравнения параметров волны напряжений до и после прохождения слоя резины определяем динамические свойства исследованных материалов.

3. Регистрация осуществлялась на оптически-динамической установке, собранной по Всесоюзном научно-исследовательском институте гидротехники им. Б. Е. Веденеева (г. Ленинград).

Установка (фиг. 1) состоит из регистрирующего прибора сверхвысокоскоростной кинокамеры СФР, поляризационно-оптической схемы, осветителя, нагрузочного устройства и системы синхронизации.

Сверхвысокоскоростная кинокамера СФР проводила съемку в режиме фоторегистрации со скоростями развертки $V_{разв.} = 3000$ и 2250 м/сек и шириной щели $b = 0.1$ мм. В качестве осветителя использована импульсная лампа ИФК-20000, помещенная в корпус с зеркальным сферическим отражателем и передней линзой $F = 40$ см, сконструированный в ЛИТМО. Лампа ИФК-20000 создавала одиночные световые вспышки с энергией $W = 7.5$ кДж и длительностью 0.25 мсек. Питание лампы осуществлялось за счет энергии, запасенной в батарее из четырех импульсных конденсаторов ИМ-5-150 при напряжении питания $U' = 10$ кВ.

Поляризационно-оптическая схема, состоящая из двух скрещенных широкопольных поляризаторов, двух четвертьволновых пластин и фокусирующего объектива, представляла собой обычный плоский полярископ [5].



Фиг. 1

Система синхронизации, обеспечивающая одновременность инициации взрыва, световой вспышки и кинорегистрации, состояла из генератора прямоугольных импульсов Г-5-15 и двух запускающих тиратронных блоков.

4. Методика дешифровки кинограмм, полученных методом динамической фотоупругости, приведена в [9].

В результате обработки кинограмм установлено, что вследствие взрыва микрозаряда в стержне из ЭК распространяется со скоростью $c_0 = (1890 \pm 50)$ м/сек продольный куполообразный импульс сжатия длительностью $T = (11.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-6}$ сек., амплитудой σ_0 , зависящей от величины заряда.

Временные интервалы измерялись с точностью до $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ сек. Значения величин напряжений определялись по формуле [5]

$$\sigma = \frac{\sigma^{(1,0)}}{h} n_{max} \quad (1)$$

с точностью $\pm 1/4$ полосы (в наших опытах $\pm 6.6 \text{ кгс/см}^2$). Здесь n_{max} — максимальный порядок изохромы [5], $h = 0.6 \text{ см}$ — толщина образца в направлении просвечивания, $\sigma_0^{(1,0)} = 15.9 \text{ кгс/см}^2$ (см/полосу — цена полосы материала ЭК по напряжениям). Скорость распространения продольных волн в резинах определялась по формуле

$$V = L \tau^{-1} \quad (2)$$

где τ — время, необходимое переднему фронту волны для прохождения слоя резины толщиной L . По найденному значению V вычислялся динамический модуль упругости $E_d = \rho V^2$, где ρ — плотность данного сорта резины.

5. Из рассмотрения кинограмм установлено, что амплитуда импульса σ_L , прошедшего слой резины толщиной L , существенно меньше σ_0 и тем меньше, чем больше величина L . В то же время длительность импульса и скорость его распространения остается прежней.

Приближенная теория распространения продольных волн напряжений в неоднородных стержнях приведена в [4]. Полученные в этой работе основные результаты заключаются в следующем. Если распространяющаяся в стержне из материала 1 продольная волна напряжений произвольной формы σ_0 встречает на своем пути изменение механических свойств материала, то есть материал 2, (без изменения площади сечения), то на границе раздела возникают отраженные (σ_r) и передающиеся (σ_t) волны. Интенсивности указанных волн связаны соотношением

$$\sigma_t = \frac{2r}{r+1} \sigma_0 \quad (3)$$

$$\sigma_r = \frac{r-1}{r+1} \sigma_0 \quad (4)$$

где $r = \frac{R_2}{R_1}$, $R = \rho V$ — акустическое сопротивление материала, ρ — плотность, V — скорость продольной волны. Длина и скорость отраженной волны такие же, как и в начальной; длина передающейся волны определяется формулой

$$\lambda_2 = \frac{V_2}{V_1} \lambda_1 \quad (5)$$

Применим результаты, полученные в [3], к нашим экспериментам.

Интенсивность волны, отраженной от слоя резины в стержень из ЭК

$$\sigma_r^0 = \frac{r_2 - 1}{r_2 + 1} \sigma_0 \quad (6)$$

а прошедшей в резину

$$r_{11}^0 = \frac{2r_1}{r_2 + 1} \quad (7)$$

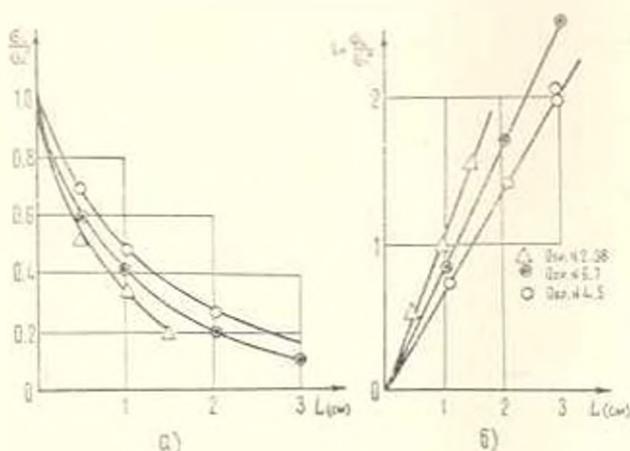
Затем из резины дальше в ЭК пройдет волна с интенсивностью

$$r_{12}^0 = \frac{2r_2}{r_2 + 1} r_{11}^0 = \frac{4r_1 r_2 c_0}{(r_2 + 1)(r_2 + 1)} = \frac{4}{(r_2 + 1)(r_2 + 1)} c_0 \quad (8)$$

Здесь

$$r_1 = \frac{1}{r_2} = \frac{R_{\text{резины}}}{R_{\text{эк}}}$$

6. Экспериментальные результаты, полученные для шести сортов резины, сведены в табл. 1. Там же приведены и значения r_{11}^0 и r_{12}^0 , подсчитанные по формулам (6), (8). Из сравнения значений r_{11}^0 , r_{12}^0 и экспериментальных r_{11} и r_{12} видно, что величины r_{11}^0 и r_{11} близки, их различие не превышает 20%, что связано с погрешностью эксперимента и приближенностью теории [4]. Большое различие величин r_{12}^0 и r_{12} может быть объяснено рассеянием энергии (затуханием) импульса в резине.



Фиг. 2

На фиг. 2а приведены зависимости $\frac{r_L}{c_0}$ от L для разных резин. Это типичные экспоненциальные кривые. На фиг. 2б приведены зависимости $\ln \frac{r_L}{c_0}$ от L . Экспериментальные точки хорошо ложатся на прямые, проходящие через начало координат. Это служит свидетельством возможности экстраполяции кривых на фиг. 2а зависимостью

$$r_L = c_0 e^{-kL} \quad (9)$$

α — показатель затухания. Значения α приведены в табл. 1; там же приведены значения логарифмического декремента затухания $\delta(r)$

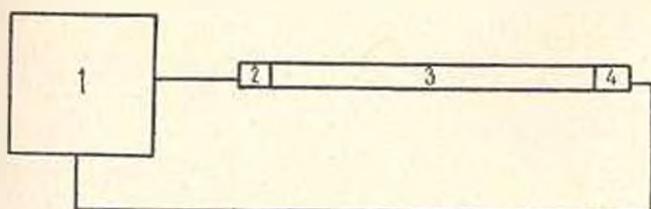
$$\delta = \alpha VT \quad (10)$$

В. Исследование динамических характеристик резин ультразвуковым методом

7. Образцами для исследования служили составные призмы с разными поперечными сечениями.

Для определения скорости прохождения продольных ультразвуковых волн и периода T основной бегущей волны при прохождении ультразвука через прямоугольные призматические образцы из резины применен прибор УКБ—1М.

Присмная и передающая ультразвуковые головки через контактную смазку прикладывались к верхнему и нижнему основаниям призмы и с помощью электронно-лучевого индикатора определялось время прохождения (запаздывания фронта) волны по известной длине образца. Блок-схема измерений приведена на фиг. 3.



Фиг. 3

При сквозном прозвучивании скорость импульсов продольных бегущих волн ультразвуковой частоты в мксек определяется из соотношений

$$C_{\text{прод.}} = \frac{L}{t} \cdot 10^6$$

где L — база измерений в метрах, t — время распространения переднего фронта сигнала в мксек.

Период T основной бегущей волны принятых сигналов определяется по формуле

$$T = \frac{t_2 - t_1}{n} \text{ мксек}$$

где t_1 — время входа, а t_2 — время распространения переднего фронта сигнала в мксек при „ n “ полных ультразвуковых колебаний.

По скорости импульсов $C_{\text{прод.}}$ и периоду T определяется длина основной бегущей волны λ в см из соотношения

$$\lambda = C_{\text{прод.}} \cdot T \cdot 10^{-4}$$

№№ пп	Сорт резины	ρ (г/см ³)	$E_{св}$ (кг/с.см ²)	L (см)	$\tau \cdot 10^6$ (срж.)	V (м.сек)	V_0 (м.сек)	E_0 (кг/с.см ²)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	0.547	33	0.5	20.7	242	245	320
2				1.0	40.3	248		334
3	4	1.320	49	0.5	4.3	1170	1210	18300
4				1.0	8.3	1200		19000
5				3.0	2.37	1260		20900
6	5	1.300	37	0.5	4.3	1170	1.12	17700
7				1.0	9.3	1080		15100
8				2.0	19.7	1020		13300
9				3.0	25.3	1180		18000
10	6	1.310	15	0.5	4.7	1060	985	14700
11				1.0	10.3	970		12200
12				2.0	21.3	940		11500
13				3.0	31.0	970		12200
14	7	1.020	10	0.5	6.0	835	847	6930
15				1.0	11.7	855		7450
16				3.0	35.3	850		7350
17	38	0.658	40	0.5	15.3	327	351	770
18				1.0	29.0	344		790
19				1.5	39.3	382		960

Таблица 1

E_d ср. (кг/с/см^2)	Данна импульса и ревл., см	z_0 (кг/с/см^2)	r_1	σ_0^2 (кг/с/см^2)	z_1 (кг/с/см^2)	σ_1^2 (кг/с/см^2)	z_2 (кг/с/см^2)	z (см^{-2})	$z_{\text{пр}} (\text{см}^{-2})$	z
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
327	0.270	106	0.06	94	80	21.6	13	1.02	0.99	0.363
		159	0.06	141	133	34.2	13	0.97		
19300	1.33	80	0.68	15	13	77	53	0.72	0.68	0.825
		172	0.70	30	26.5	159	80	0.69		
		185	0.73	29	26.5	180	26.5	0.64		
16000	1.21	80	0.67	15.5	13	77	53	0.72	0.71	0.875
		185	0.62	43	40	170	80	0.69		
		185	0.59	48	40	168	40	0.72		
12400	1.08	159	0.68	30	26.5	153	13	0.72	0.87	0.941
		133	0.62	31.5	26.5	136	80	0.86		
		172	0.56	48	40	158	66	0.87		
7240	0.94	172	0.55	50	40	156	26.5	0.90	0.85	0.795
		172	0.56	48	40	158	13	0.84		
		80	0.37	31	26.5	62	40	0.86		
810	0.385	120	0.38	54	53	94	40	0.87	0.96	0.370
		172	0.38	79	56	140	13	0.83		
		133	0.095	119	106.5	42	26.5	0.92		
810	0.385	185	0.101	148	133	62	26.5	0.91	0.96	0.370
		185	0.111	149	133	66.5	13	1.05		

Имея скорости продольных ультразвуковых волн, можно из соотношения

$$c_{\text{поперечн.}} = c_{\text{прод.}} \sqrt{\frac{1-2\mu}{2-2\mu}}$$

определить скорости распространения поперечных ультразвуковых волн. Здесь μ — коэффициент Пуассона исследуемого образца.

Для полимерных материалов μ ближе к 0.5, значит скорость поперечных ультразвуковых волн почти на порядок меньше скорости продольных ультразвуковых волн, а для материалов с величиной порядка 0.3 — почти в два раза (табл. 2).

Таблица 2

Определение периода, скорости и длины ультразвуковых продольных волн при разных частотах в резиновых цилиндрических образцах

№№ образ.	базис L (см.)	Частота $f = 25 \text{ kHz}$			Частота $f = 150 \text{ kHz}$				
		Время прохождения волны $t \cdot 10^{-6}$ (сек.)	Период $T \cdot 10^{-6}$ (сек.)	Скорость $c_{\text{прод.}}$ (м/сек.)	Длина волны λ (см.)	$t \cdot 10^{-6}$ (сек.)	$T \cdot 10^{-6}$ (сек.)	$V_{\text{прод.}}$ (м/сек.)	$\lambda = VT \cdot 10^{-4}$ (см.)
4	50.03	336.0	17.22	1475	2.541	323.3	13.44	1547	2.081
5	49.07	330.0	18.44	1481	2.740	306.8	14.89	1599	2.381
6	46.17	340.1	18.89	1360	2.576	330.0	14.42	1398	2.015
7	48.90	1454.5	30.39	336	1.025	—	—	—	—
11	30.20	215.0	25.83	1405	3.629	202.5	21.83	1491	3.255
12	30.50	906.0	24.13	337	0.813	—	—	—	—
13	30.16	208.0	20.67	1450	3.000	202.0	17.50	1510	2.643
14	30.25	210.0	21.50	1440	3.100	201.5	18.67	1496	2.793
15	31.20	331.0	56.00	943	5.279	—	—	—	—
16	30.42	917.5	50.00	332	1.658	—	—	—	—
17	30.30	222.5	26.30	1362	3.582	204.0	21.50	1485	3.193
18	30.45	920.0	85.00	331	2.814	—	—	—	—
19	30.35	206.0	21.67	1470	3.185	197.0	20.00	1511	3.082
20	30.46	915.0	24.50	333	0.816	—	—	—	—
21	30.40	233.0	24.67	1305	3.220	203.0	21.33	1498	3.195
22	30.40	212.0	22.50	1434	3.227	197.0	18.67	1543	2.881
23	30.54	213.0	22.67	1434	3.251	196.5	17.50	1554	2.720
24	30.64	207.0	21.67	1480	3.207	191.5	19.00	1600	3.040
25	30.50	205.0	22.67	1488	3.373	190.0	18.00	1605	2.890
26	30.40	221.0	26.33	1376	3.623	202.5	22.18	1501	3.328
27	30.53	917.5	31.00	333	1.032	—	—	—	—
28	30.50	197.5	23.00	1544	3.551	187.0	18.33	1631	3.000
29	30.43	193.5	23.00	1573	3.618	185.0	18.00	1645	2.961
30	30.45	191.5	21.50	1590	3.419	183.0	17.67	1664	2.940

Во всех опытах выполнялось требование, чтобы длина ультразвуковой волны λ в любом направлении была бы на порядок меньше геометрических размеров образца (табл. 2).

8. Ультразвуковым методом определялись динамические характеристики образцов: динамический модуль упругости $E_{\text{дин.}}$ и динамический модуль сдвига $G_{\text{дин.}}$.

Величина $E_{\text{дин.}}$ в образцах определялась на основе измеренной прибором УКБ-1М скорости распространения импульсов продольных ультразвуковых волн из соотношения:

$$E_{\text{дин.}} = \frac{\rho c_{\text{прод.}}^2 \cdot 10}{k \cdot 981} \left(\frac{k \Gamma c}{\text{см}^2} \right)$$

где ρ — объемный вес образца в г/см^3 ,

$$k = \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (11)$$

Динамический модуль сдвига $G_{\text{дин.}}$ определяется по формуле

$$G_{\text{дин.}} = \frac{E_{\text{дин.}}}{2(1 + \mu)}$$

Полученные результаты для 13-ти разных сортов резин приведены в табл. 3.

Таблица 3

Номер образца п/п	Плотность ρ (г/см^3)	Коэффициент Пуассона μ_{max}	Значение "К" по формуле (11)	Скорость продольных УЗВ $c_{\text{прод.}}$ при 25 кГц (м/сек.)	Скорость поперечных УЗВ $c_{\text{попер.}}$ при 25 кГц (м/сек.)	Динамический модуль упругости $E_{\text{дин.}} \cdot 10^{-4}$ (кгГс/см^2)	Динамический модуль сдвига $G_{\text{дин.}} \cdot 10^{-4}$ (кгГс/см^2)
6	1.314	0.200	1.111	1360	830.0	2.22	0.93
11	1.225	0.480	8.770	1400	275.0	0.279	0.094
12	1.150	0.460	4.630	340	95.3	0.253	0.087
13	1.235	0.485	11.540	1450	248.0	2.290	0.771
14	1.311	0.456	4.270	1440	409.0	0.624	0.214
15	1.258	0.480	8.770	943	185.0	0.129	0.044
16	1.333	0.483	10.220	332	60.2	0.015	0.005
17	1.302	0.471	6.200	1360	319.0	0.394	0.134
18	1.205	0.427	2.750	331	118.0	0.486	0.170
19	1.308	0.495	33.600	1470	147.0	0.085	0.028
20	1.282	0.492	21.210	333	41.8	0.069	0.023
21	1.278	0.480	8.770	1305	256.0	0.252	0.085
22	1.388	0.340	1.540	1434	710.0	1.882	0.679

9. Из сопоставления полученных результатов по вышеописанным методам устанавливается, что они сходятся с достаточно большой точностью.

Ордена Трудового Красного Знамени
Институт геофизики и инженерной сейсмологии
АН Армянской ССР, г. Ленинакан

Поступила 15 XI 1972

Всесоюзный научно-исследовательский
институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева
г. Ленинград

Պ. Մ. ԽԱՉԱՏՐԻԱՆ, ՅԱ. Ն. ՑՈՒԿԵՐՄԱՆ

ՌԵՏԻՆՆԵՐԻ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐՈՉՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ
ԳԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ԲԵՌՆԱՎՈՐՄԱՆ ԳԵՓՔՈՒՄ

Ա մ փ ո Վ ու լ

Հոդվածում բերված է մոդելադրման նպատակով ընտրվող տարբեր տեսակի սետինների մեխանիկական բնութագրիչների որոշումները գինամիկական փորձարկումների ժամանակ: Մասնավորաբար գիտարկվում են «ետադոտման գինամիկական ֆոտոառաձգականության և ուլտրաձայնային մեխոգրերը:

Գինամիկական ֆոտոառաձգականության մեխոգրով ուսումնասիրվել են 6 տարբեր տեսակի սետիններ, իսկ ուլտրաձայնային մեխոգրով մինչև 24 տարբեր տեսակի սետիններ: Փորձարկումներից ստացված արդյունքներն ամփոփված են երեք աղյուսակներում և երկու զմայրերում:

Նկարագրված են ուսումնասիրման մեխոգրերը և հաշվումների տեխնիկան: Ստացված արդյունքների բաղդատումներից նորակայություն է, որ ուսումնասիրման մեխոգրերը ապիս ևն ցանկալի արդյունքներ:

DETERMINATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS
OF RUBBER UNDER DYNAMIC LOADING

P. M. KHACHATRIAN, J. N. TSUKERMAN

S u m m a r y

The results of determining mechanical characteristics of rubber under dynamic loading to select model material are presented.

The dynamic photoelasticity and ultrasonic methods of investigation are discussed in particular.

The dynamic photoelasticity method was used to study six different kinds of rubber while the supersonic one was employed to test more than twenty-four various sorts of rubber. The experimental results are presented in three tables and two drawings.

The methods of investigation and computation are also described. The results obtained show that different methods can provide desired data.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Берман А. Ультразвук. Изд. ИЛ, М., 1957.
2. Брижиков Н. И. Ультразвуковые методы. Изд. «Наука», М.—Л., 1965.
3. Гольдсмит В. Динамическая фотоупругость. Сб. «Физика быстротекающих процессов», т. 2. Изд. «Мир», М., 1971.
4. Donnel L. H. Trans. ASME, APM. 52, 14, 1930.

5. Дюрелли А., Райли У. Введение в фотомеханику. Изд. „Мир“, М., 1970.
6. Кацнельсбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. Изд. „Наука“, М., 1966.
7. Клякин Н. Н., Колесников А. Е. Акустические измерения в судостроении. Изд. „Судостроение“, Л., 1968.
8. Малышев Л. К. Применение полимеров для модельных исследований методом динамической фотоупругости. Механика полимеров, 3, 1972.
9. Малышев Л. К., Паиталсея А. А. Кинематографическое исследование быстропротекающих процессов с помощью поляризационного света. Ж. научной и прикладной кинематографии АН СССР, № 1, 1970.
10. Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1965.
11. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. Изд. ИЛ, М., 1963.