

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, д-р техн. наук, зав. отд.,
ИПМ НАН Украины, Киев;
Е. А. КОЗИРАЦКИЙ, соискатель, м.н.с. ИПМ НАН Украины,
Киев;
А. Н. КОЛЕСНИКОВ, н.с. ИПМ НАН Украины, Киев;
Л. О. ТЕСЛЕНКО, н.с. ИПМ НАН Украины, Киев

СРАВНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе приведены результаты расчётов, а так же экспериментального определения импульсным и резонансным методами характеристик упругости различных материалов, как широко используемых, так и обладающих специальными свойствами. Отмечено, что разница между получаемыми по этим методам величинами модуля упругости изменяется в зависимости от свойств материала и может достигать 15 %. Для уменьшения расхождений рекомендуется адаптация метода измерений к исследуемому материалу.

Ключевые слова: модуль упругости, скорость распространения упругой волны, резонанс, резонансный метод, импульсный метод.

Введение. Модули упругости – важнейшие характеристики твердого тела [1]. Они являются расчетными параметрами в аналитическом аппарате физической теории деформации и разрушения твердого тела, базирующейся на современной теории дислокаций. Модули упругости входят во все уравнения механики твердого тела и служат основными параметрами в конструкторских расчетах сооружений, машин и механизмов. Модули упругости традиционных материалов можно найти в справочнике, но для вновь создаваемых материалов необходимо эти модули измерить. Для неразрушающего определения модулей упругости используют динамические методы, в основе которых лежат известные соотношения между скоростями распространения (СР) продольных и поперечных объёмных упругих волн (УВ), или УВ в стержне, и характеристиками упругости твердого тела [2].

Анализ последних исследований и литературы. Динамические методы определения характеристик упругости материалов широко используют с шестидесятых годов прошлого столетия [3]. Сегодня измерение величин характеристик упругости динамическими методами остаётся актуальным в связи с постоянным появлением новых материалов с особыми физическими свойствами [4]. Для этих материалов ис-

пользование известных методик может привести к существенным промахам [5]. Назрела необходимость критически пересмотреть эти методики применительно к материалам со специальными свойствами.

Цель статьи. Провести сопоставительный анализ наиболее широко используемых динамических методов измерения характеристик упругости на материалах с различными свойствами.

Постановка проблемы. Существует достаточно большое количество методов измерения характеристик упругости твердых тел, каждый из которых имеет определенные достоинства и недостатки. Выбор того или иного из них определяется диапазоном изменения измеряемой величины, требуемой точностью измерения, размерами деталей, их конфигурацией и рядом других факторов. Представляет интерес, дадут ли различные динамические методы определения характеристик упругости одинаковые результаты и насколько совпадение результатов будет зависеть от свойств материалов.

Материалы исследований. Для сопоставления выбраны наиболее широко используемые динамические методы определения характеристик упругости материалов: импульсный и резонансный.

В соответствие первому в однородной изотропной твердой среде связь характеристик упругости материала со СР УВ определяется известными [6] формулами:

$$E = \frac{c_l^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}, \quad G = c_t^2 \rho, \quad \nu = \frac{1 - 2(c_t / c_l)^2}{2(1 - (c_t / c_l)^2)}, \quad (1)$$

где E , G - модули растяжения-сжатия и сдвига, соответственно; c_b , c_t - СР продольной и поперечной УВ, соответственно; ν - коэффициент Пуассона; ρ - плотность.

В соответствие резонансному методу в заданном направлении связь модуля упругости материала со СР УВ определяется известной [2] формулой:

$$E = c_{cm}^2 \rho, \quad (2)$$

c_{cm} - СР УВ в стержне.

Сопоставляя эти два метода, следует сразу отметить, что для определения одного модуля в изотропном теле резонансным методом нужно сделать измерение одной СР УВ, тогда как для импульсного метода измерение одной СР УВ может дать только модуль сдвига, а определение модуля растяжения-сжатия требует обязательного измерения двух СР УВ. Правда, при этом мы получаем полный набор характеристик упругости для изотропного тела. Для анизотропных тел в

резонансном методе для каждого направления необходимо изготавливать отдельный образец [7], тогда как импульсный метод позволяет измерять в одном образце различные модули [8].

В качестве исследуемых материалов были выбраны: органическое стекло как представитель классической однородной изотропной твёрдой среды, применяемые в акустике для эталонных измерений [9]; широко используемые в промышленности углеродистая и нержавеющая стали, представляющие собой квазиизотропные квазиоднородные среды [2]; и порошковое железо – как представитель перспективного трансверсально-изотропного материала с развитой многоуровневой структурой [10]. Данные по акустическим характеристикам этих материалов и их характеристикам упругости, взятые из справочников [1, 2, 3, 9], приведены в табл. 1. Для порошкового железа (ПЖ) разной пористости (θ) в этой таблице приведены оценки характеристик упругости по приближённым формулам [10]:

$$E = E_0(1 - \theta), \quad G = G_0(1 - \theta), \quad \nu = \nu_0(1 - \theta), \quad (3)$$

где индекс "0" относится к беспористому материалу, в нашем случае – железу.

Таблица 1 – Характеристики материалов по данным справочников

№ п/п	Материал	Плотность, 10^3 кг/м^3	Скорость УЗ, 10^3 м/с			Характеристики упругости		
			c_l	c_t	c_{cm}	$E, \text{ ГПа}$	$G, \text{ ГПа}$	ν
1	Стекло органическое	1,18	2,65-2,75	1,10-1,13	1,84-2,14	3-4	-	-
2	Сталь углеродистая	7,77-7,85	5,90-5,94	3,22-3,25	5,10-5,18	200-210	77-81	0,28-0,31
3	Сталь нержавеющая	7,9-8,2	5,66-6,14	3,12-3,25	5,04			
4	Железо	7,80-7,87	5,85-6,06	3,23-3,33	5,17	195-227	81,2-88,5	0,25-0,29
5	ПЖ 1	6,50	-	-	-	~162	~162	~0,22
6	ПЖ 2	6,38	-	-	-	~158	~158	~0,21
7	ПЖ 3	5,75	-	-	-	~157	~157	~0,21

Если, в соответствии с исследуемыми динамическими методами, считать известными c_l и c_t для импульсного метода или c_{cm} – для резонансного, то можно рассчитать модули упругости. Результаты этих расчётов по данным справочников (см. табл. 1) приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Характеристики упругости материалов, рассчитанные по скоростям ультразвука из справочников

№ п/п	Материал	По формулам (1)			По формуле (2)
		E , ГПа	G , ГПа	ν	E , ГПа
1	Стекло органическое	3,9-4,5	1,43-1,51	0,39-0,40	4,0-5,4
2	Сталь углеродистая	195-217	80,6-82,9	0,28-0,31	202-211
3	Сталь нержавеющая	171-258	76,9-86,6	0,25-0,33	201-208
4	Железо	193-234	81,4-87,3	0,26-0,31	209-232

Сопоставительный анализ характеристик упругости в табл. 1 и полученных по формуле (2) в табл. 2 показывает хорошее совпадение для сталей, что свидетельствует о высокой степени изученности этого материала. Для оргстекла неожиданно в табл. 2 получены завышенные значения модуля. Этот факт требует дополнительного изучения. Расхождения для железа можно объяснить наличием анизотропии, что далеко не всегда отмечается в справочниках.

Сопоставление в табл. 2 модулей, рассчитанных по формулам (1) и (2) показывает, что использование двух исходных параметров для оценки модуля расширяет диапазон оценочных значений в импульсном методе. Более низкие значения для оргстекла в расчётах по формулам (1) можно объяснить высоким значением коэффициента Пуассона.

Для сопоставления экспериментальных результатов измерений рассматриваемыми методами на одинаковых объектах были изготовлены образцы исследуемых материалов в форме балок и цилиндров разных размеров (рис. 1). На рис. 1 показаны направления прозвучивания импульсным методом (1, 2) и резонансным (3). Образцы ПЖ были вырезаны из заготовки вдоль и поперёк прилегаемой при формировании этой заготовки нагрузки F (рис. 1, ν и ζ). Наличие у ПЖ трансверсальной анизотропии предполагает неодинаковость характеристик упругости материала вдоль и поперёк прессования [10], поэтому сопоставление рассматриваемых методов на одном образце в одинаковых условиях оказалось возможным только в направлении, перпендикулярном прессованию с соответствующей поляризацией поперечной волны (рис. 1, ν). Характеристики образцов приведены в табл. 3.

В импульсном методе СВ УВ определяли по времени сквозного прохождения упругого импульса через исследуемый образец. Струк-

турная схема измерений показана на рис. 2. Измерение времени прохождения проводили на частоте 5 МГц методом радиоимпульса с дискретной задержкой [11].

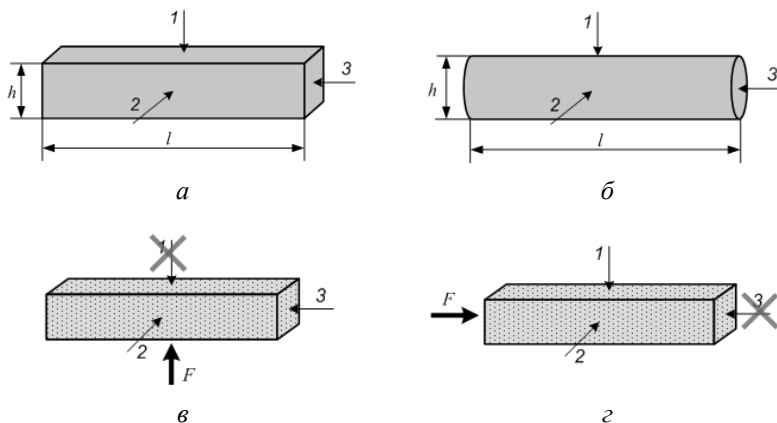


Рис. 1 – Исследуемые образцы, направления их прозвучивания и прессования: *a* – балка; *б* – цилиндр; *в* – образец ПЖ, вырезанный поперёк направления прессования; *г* – образец ПЖ, вырезанный вдоль направления прессования

Таблица 3 – Характеристики исследуемых образцов

№ п/п	Материал	Форма	Размеры, мм		Плотность, 10^3 кг/м^3	Пористость, %
			<i>l</i>	<i>h</i>		
1	Стекло органическое	рис. 1, б	40	6	1,18	-
2	Сталь углеродистая	рис. 1, а	62	8	7,82	-
3	Сталь нержавеющая	рис. 1, б	40	6	7,95	-
4	ПЖ 1	рис. 1, в, г	43	4	6,50	21,4
5	ПЖ 2	рис. 1, в, г	43	4	6,38	20,6
6	ПЖ 3	рис. 1, в, г	43	4	5,75	18,7

СР УВ (продольной или поперечной) определяли по формуле:

$$c = \frac{h}{t_{\text{изм}} - t_o}, \quad (4)$$

где $t_{\text{изм}}$ – измеряемое время; t_o – систематическая погрешность измерений.

В резонансном методе возбуждали в образцах вынужденные ультразвуковые колебания и определяли первую резонансную частоту. Структурная схема измерений показана на рис.3.

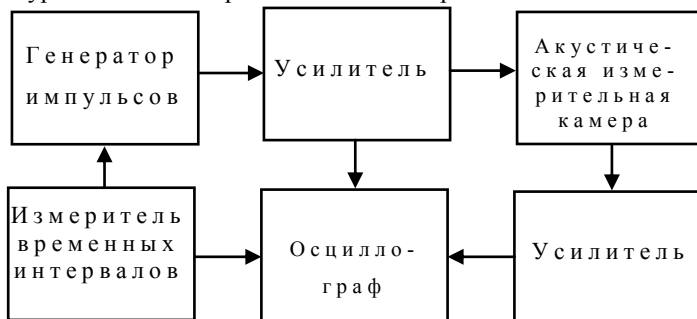


Рис. 2 – Структурная схема измерений CP UV импульсным методом

По резонансной частоте f , рассчитывали CP UV в стержне [3], по формуле:

$$c_{cm} = \frac{f}{2l}, \quad (5)$$

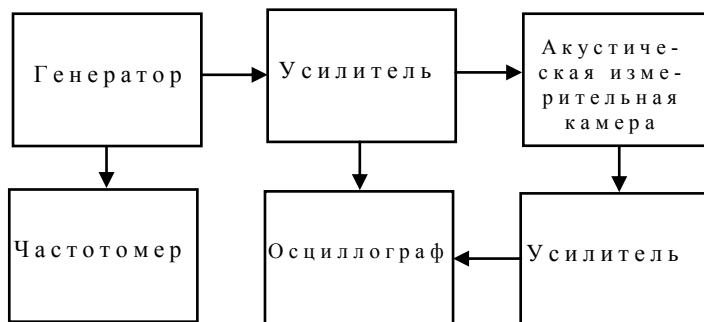


Рис. 3 – Структурная схема измерений CP UV резонансным методом

Погрешность определения CP UV в исследуемых образцах для обоих методов не превышала 0,5 %, а модулей упругости – 1 %.

Результаты измерений CP UV двумя методами для образцов из разных материалов и соответствующие значения модулей упругости приведены в табл. 4.

Сопоставление экспериментальных результатов (табл. 4) с расчётными (табл. 2) показывает хорошее совпадение между ними для всех материалов.

Таблица 4 – Результаты измерений

Материал	$c_t, 10^3$ м/с	$c_l, 10^3$ м/с	$c_{cm}, 10^3$ м/с	$E_{имп},$ ГПа	$G,$ ГПа	ν	$E_{рез},$ ГПа
Оргстекло	2,68	1,10	1,99	3,96	1,43	0,40	4,67
Сталь углеродистая	5,95	3,14	5,17	202,0	77,3	0,306	208,8
Сталь нержавеющая	5,56	2,97	4,86	182,3	70,1	0,30	187,4
ПЖ 1	4,47	2,63	4,42	100,7	39,7	0,25	112,1
ПЖ 2	4,42	2,61	4,20	99,5	43,5	0,25	112,3
ПЖ 3	4,94	2,85	4,32	113,1	52,9	0,30	121,2

Большое расхождение результатов между оценочными (табл. 1) и экспериментальными (табл. 4) значениями для ПЖ указывает на несовершенство расчётных моделей, отображаемых формулами (3).

Сопоставление экспериментальных результатов по рассматриваемым методам показывает, что динамические модули упругости, определённые импульсным и резонансным методами, отличаются для сталей не более, чем на 3 %, для ПЖ – не более, чем на 7-12 %, в зависимости от пористости, а для оргстекла – на 15 %.

Анализ полученных результатов позволяет выделить следующие тенденции, приводящие к увеличению разницы между величинами модулей упругости, определяемых импульсным и резонансным методами. Во-первых, это увеличение коэффициента Пуассона. Во-вторых, – увеличение неоднородности материала, приводящее к неодинаковым условиям взаимодействия УВ с его элементами структуры для разных методов. Эта неодинаковость может быть обусловлена различными механизмами, например распределением напряжений внутри материала [12] или более высоким на частотах импульсного метода затуханием вследствие рассеяния и поглощения УВ на элементах структуры [5].

Выводы. В результате расчётов по известным справочным данным, а так же экспериментального определения импульсным и резонансным методами характеристик упругости различных материалов, как широко используемых, так и обладающих специальными свойствами, установлено, что разница между получаемыми по этим методам величинами

модуля упругости изменяется в зависимости от свойств материала и может достигать 15 %.

Поскольку метод измерений не должен влиять на объективные значения характеристик упругости материала, следует искать пути совершенствования методов измерений. Один из таких путей может быть связан с адаптацией метода измерений к исследуемому материалу.

Список литературы: 1. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. 2. Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник – К.: Наукова думка, 1982. – 285 с. 3. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав. ред. И. П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с. 4. Безымянный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. № 5-6. – С 23-33. 5. Безымянный Ю. Г. Акустическое отображение материалов, изготовляемых методами порошковой металлургии. // Акустичний вісник. – т.9. № 2. – 2006. – С 3–16. 6. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теория упругости. – М., 1965. 7. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1980. – 280 с. 8. Алешин А. П., Белый В. Е., Вopilкин А. Х. и др. Методы акустического контроля металлов. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с. 9. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с. 10. Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Мн.: Выssh. shk., 1989. – 182 с. 11. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 302 с. 12. Машиностроение: Энциклопедический справочник: В 15 т. / под общ. ред. Е. А. Чудакова. Т. 4: Материалы машиностроения. – М.: Госуд.н.-т. из-во машиностроительной литературы, 1947. – 429 с.

Bibliography (transliterated): 1. Grigor'eva I. S., Mejliхова. E. Z. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik*. Moscow.: Jenergoatomizdat, 1991. 2. Francevich I. N., Voronov F. F., Bakuta S. A. *Uprugie postojannye i moduli uprugosti metallov i nemetallov. Spravochnik*. Kiev.: Naukova dumka, 1982. 3. *Ul'trazvuk. Malen'kaja jenciklopedija*. Ed. Goljamina. I. P. Moscow.: Sovetskaja jenciklopedija, 1979. 4. Bezimyannij Y. G. *Vozmozhnosti akusticheskikh metodov pri kontrole struktury i fiziko-mehaničeskikh svojstv poristykh materialov // Poroshkovaja metallurgija*. No 5-6. – 2001. 23-33. Print. 5. Bezimyannij Y. G. *Akusticheskoe otobrazhenie materialov, izgotovljaemykh metodami poroshkovoj metallurgii. // Akustichnij visnik*. No 2. – 2006. 3–16. Print. 6. Landau L. D., Livshic E. M. *Teorija uprugosti*. Moscow., 1965. 7. Shutilov V. A. *Osnovy fiziki ul'trazvuka*. Izd-vo Leningradskogo un-ta, 1980. 8. Aleshin A. P., Belyj V. E., Vopilkin A. H. *Metody akusticheskogo kontrolya metallov*. Moscow.: Mashinostroenie, 1989. 9. *Nerazrushajushij kontrol' i diagnostika: Spravochnik*. / V. V. Kljuev. Moscow.: Mashinostroenie, 2003. 10. Roman O. V., Skorohod V. V., Fridman G. R. *Ul'trazvukovoj i rezistometricheskij kontrol' v poroshkovoj metallurgii*. Mn.: Vyssh. shk., 1989. 11. Trujell R., Jel'baum Ch., Chik B. *Ul'trazvukovyje metody v fizike tverdogo tela*. Moscow.: Mir, 1972. 12. Chudakov E. A. *Mashinostroenie: Jenciklopedičeskij spravochnik: V 15 t.* / Vol. 4: *Materialy mashinostroenija*. – Moscow: Gosud.n.-t. iz-vo mashinostroitel'noj literatury, 1947. Print.

Поступила (received) 02.06.2014