

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

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

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

В соответствии 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 прилагаемой при формовании этой заготовки нагрузки F (рис. 1, ϵ 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, ϵ). 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].

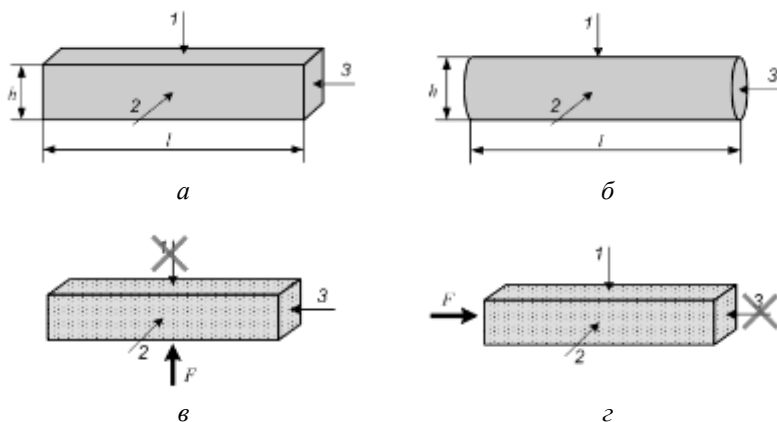


Рис. 1 – Исследуемые образцы, направления их прозвучивания и прессования: *a* – балка; *б* – цилиндр; *в* – образец ПЖ, вырезанный поперёк направления прессования; *з* – образец ПЖ, вырезанный вдоль направления прессования

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, <i>б</i> | 40 | 6 | 1,18 | - |
| 2 | Сталь углеродистая | рис. 1, <i>a</i> | 62 | 8 | 7,82 | - |
| 3 | Сталь нержавеющая | рис. 1, <i>б</i> | 40 | 6 | 7,95 | - |
| 4 | ПЖ 1 | рис. 1, <i>в, з</i> | 43 | 4 | 6,50 | 21,4 |
| 5 | ПЖ 2 | рис. 1, <i>в, з</i> | 43 | 4 | 6,38 | 20,6 |
| 6 | ПЖ 3 | рис. 1, <i>в, з</i> | 43 | 4 | 5,75 | 18,7 |

СР УВ (продольной или поперечной) определяли по формуле:

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

где $t_{изм}$ – 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.

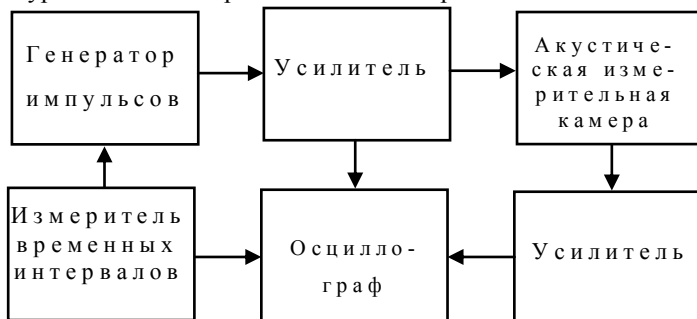


Рис. 2 – Структурная схема измерений СР УВ импульсным методом

По резонансной частоте f , рассчитывали СР УВ в стержне [3], по формуле:

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

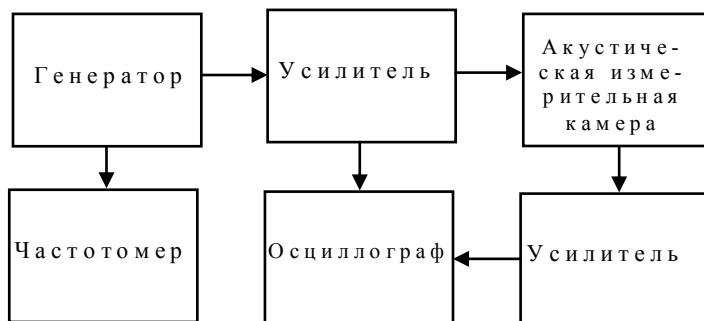


Рис. 3 – Структурная схема измерений СР УВ резонансным методом

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

Результаты измерений СР УВ 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 | $c_s, 10^3$ 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., Воронцов 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., Mejlilova. 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. Bezimyanniy Y. G. *Vozmozhnosti akusticheskikh metodov pri kontrole struktury i fiziko-mehaničeskikh svojstv poristykh materialov // Poroshkovaja metallurgija*. No 5-6. – 2001. 23-33. Print. 5. Bezimyanniy 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 kontrolja metallov*. Moscow.: Mashinostroenie, 1989. 9. *Nerazrushajushhij 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: Jenciklopedicheskij spravochnik: V 15 t.* / Vol. 4: *Materialy mashinostroenija*. – Moscow: Gosud.n.-t. iz-vo mashinostroitel'noj literatury, 1947. Print.

Поступила (received) 02.06.2014