УДК 534.6:534.22.620.179.16

**Исследование динамического метода определения модулей упругости материалов**

**Т.В. Крокош, П.В. Базылев**

Дальневосточный филиал ФГУП "ВНИИФТРИ", г. Хабаровск

E-mail: krokosh@dfvniiftri.ru, bazylev@dfvniiftri.ru

*Представлены результаты исследований динамического метода определения модулей упругости материалов на основе измерений скоростей распространения продольных и поперечных акустических волн с применением бесконтактных емкостных методов возбуждения и регистрации ультразвука. Динамический способ определения модулей упругости имеет преимущества, так как является неразрушающим и может применяться непосредственно для конкретных образцов. Определение модулей упругости основано на известной связи последних со скоростью упругих волн. Приведены результаты измерений и их сравнение с табличными значениями модулей упругости для ряда конструкционных материалов.*

Модули упругости твердых сред являются важными фундаментальными физическими величинами, характеризующими механические свойства материалов. Физико-механические характеристики материалов служат важнейшими расчетными параметрами в аналитическом аппарате физики твердого тела, физической теории деформации и разрушения твердого тела, конструкторских расчетах сооружений, машин и механизмов.

Методы определения модулей упругости можно разделить на статические и динамические. В статических испытаниях изготавливается стандартный образец заданной геометрической формы из данного материала и подвергается неизменному (или медленно изменяющемуся) во времени воздействию с помощью, например, разрывных испытательных машин. Динамические методы, в свою очередь, можно разделить на методы, использующие непрерывные колебания, и импульсные методы. Динамические методы, в принципе, являются более точными, чем статические, так как величины напряжений и деформаций и время протекания процессов весьма малы и, соответственно, не возникают пластические деформации и не успевают развиться деформации ползучести, а погрешности измерений исходных величин могут быть меньше.

Динамические импульсные (акустические) методы определения модулей упругости основаны на их связи со скоростями упругих продольных и поперечных волн в материале
[1 – 2]. Таким образом, измеряя скорости продольных *CL* и поперечных *CS* ультразвуковых (УЗ) волн, можно определить такие упругие постоянные, как *Е* – модуль упругости (модуль Юнга), *G* – модуль сдвига, *К* – модуль объемного сжатия, ν – коэффициент Пуассона, λ и μ – коэффициенты Ламе.

Для изотропного твердого тела имеем следующие выражения [2] (для определенности выберем следующие модули – *Е*, *G* и ν):

, , , (1)

где ρ – плотность материала.

Плотность ρ измеряют с погрешностью порядка 10-3 %, и, соответственно, точность измерения упругих модулей определяется точностью измерения параметров  и .

В Дальневосточном филиале ФГУП «ВНИИФТРИ» разработана установка для комплексных измерений акустических параметров твердых сред ИЗУ-1 [3], в которой применяются бесконтактные широкополосные (1–50 МГц) емкостные методы возбуждения и регистрации УЗ волн. Установка предназначена для прецизионных измерений скорости распространения и коэффициента затухания продольных УЗ волн в твердых средах (металлах и диэлектриках с металлизированными поверхностями) эхо-импульсным и резонансным методами измерений, групповых скоростей распространения продольных и сдвиговых УЗ волн импульсным методом. Установка применяется в качестве рабочего эталона 1 разряда согласно Государственной поверочной схеме для средств измерений скоростей распространения и коэффициента затухания ультразвуковых волн в твердых средах. Схема установки приведена на рис. 1.

*Рис. 1.* Структурная схема установки при измерениях скорости распространения и

*б*

2

*CP*

*CP*

*R*

*R*

*S*

4

5

*II*

*I*

1

3

6

10

*а*

запуск

9

2

*CP*

*CP*

*R*

*R*

*S*

4

5

1

8

*II*

*I*

3

6

7

коэффициента затухания продольных УЗ волн эхо-импульсным (а) и резонансным (б) методами.

*I*, *II* – возбуждающий и приемный ЕП. 1, 3 – электроды; 2 – мера (образец); 4, 5 – источники постоянного поляризующего напряжения; 6 – предусилитель; 7 – полосовой усилитель; 8 – генератор радиоимпульсов; 9 – цифровой запоминающий осциллограф; 10 – анализатор спектра.

S – диэлектрический слой; *Ср* – разделительный конденсатор; *R* – зарядное сопротивление.

Структурная схема установки при работе в эхо-импульсном режиме показана на рис. 1(а). Радиоимпульс требуемой амплитуды, длительности и частоты заполнения *f*, формируемый генератором радиоимпульсов 8, с помощью излучающего ЕП *I*, образованного возбуждающим электродом *1* и проводящей поверхностью образца *2*, преобразуется в УЗ импульс с той же частотой заполнения *f*. Переотраженные в образце *2* УЗ импульсы, которые распространяются в мере со скоростью продольных УЗ волн *CL* с помощью приемного ЕП *II*, расположенного соосно с излучающим ЕП на противоположной стороне образца и образованного приемным электродом *3* и поверхностью образца *2*, преобразуются в электрический сигнал, который усиливается с помощью предусилителя *6* и полосового усилителя *7* и подается на вход цифрового запоминающего осциллографа (ЦЗО) *9*, с помощью которого производится контроль амплитудно-временных параметров УЗ импульсов и измерения временных интервалов между УЗ импульсами  и отношения амплитуд УЗ импульсов *Anm*. Переотражённые УЗ импульсы регистрируются в режиме работы ЦЗО «усреднение», которое существенно повышает отношение сигнал–шум. При измерениях параметров  и *Anm* используется метод совмещения импульсов на экране ЦЗО.

Структурная схема установки при работе в резонансном режиме показана на рис. 4.2 (б). С выхода анализатора спектра *10* радиочастотный сигнал подается на излучающий ЕП *I*, с помощью которого преобразуется в непрерывные УЗ колебания в образце. На резонансных частотах *fmax*, кратных , где *d* – толщина образца, *m* – целое число, формируются акустические спектральные линии (АСЛ), ширина которых Δ*F* связана с величиной коэффициента затухания УЗ волн в материале образца. С помощью приемного ЕП *II* акустический сигнал преобразуется в электрический и через предусилитель *6* возвращается на вход анализатора спектра, на экране которого наблюдаются АСЛ. Анализируя частотную картину, выбирают требуемую АСЛ, положение которой наиболее близко к требуемой частоте УЗ колебаний. Используя маркеры анализатора спектра, определяют частоту максимума АСЛ  и ширину АСЛ Δ*F* на заданном уровне β от максимума.

Скорость распространения продольных УЗ волн *CL* в эхо-импульсном режиме работы определяется по формуле

  , (2)

где Δ*Сдиф* – дифракционная поправка; *m* и *n* – номера УЗ импульсов.

Скорость распространения продольных УЗ волн *CL* в резонансном режиме работы определяется по формуле

. (3)

Для измерений групповой скорости распространения продольных и сдвиговых УЗ волн применяется импульсный метод измерений. Схема установки при работе в импульсном режиме измерений аналогична показанной на рис. 1(а), при этом вместо генератора радиоимпульсов *8* включается генератор прямоугольных электрических импульсов Г5-88. Сдвиговая составляющая УЗ сигнала формируется в результате возникновения упругих напряжений на границе зоны возбуждения, имеющей конечные размеры.

Скорость распространения сдвиговых УЗ волн *CS* определяется по формуле

, (4)

где *ТS* – время прихода сдвиговой составляющей УЗ сигнала (с поправкой на собственные задержки установки);  – дифракционная поправка.

Целью данной работы является экспериментальное определение модулей упругости *Е* и *G* акустическими методами, оценка точности их измерений при помощи установки ИЗУ-1 и сравнение результатов измерений со справочными данными.

Измерения скорости распространения продольных и поперечных УЗ волн проведены в пяти образцах из материалов, указанных в таблице 1. Образцы представляли собой собой плоcкопараллельные цилиндрические плиты толщиной *d* и диаметром *D* не менее3*d* для исключения влияний отражений от боковых граней.

Скорость продольных и сдвиговых УЗ волн измерена импульсным методом. Границы относительной погрешности измерений не превышали значений δ*CL*= ±0,1 % и δ*CS*= ±0,5 %. Плотность материалов принята в соответствии со справочными данными.

Модули Юнга *Eрасч* и сдвига *Gрасч* рассчитаны по формулам (1). Табличные значения *Eтабл* и *Gтабл* приведены как наиболее типовые значения по различным справочным данным [4 – 7]. Характерной особенностью справочных данных являются достаточно широкие пределы рассеяния значений и отсутствие информации о точности приведенных значений.

Относительная погрешность измерений модулей упругости *Е* и *G* определялась в соответствии с [Селиванов, Качество измерений] с допускаемой неопределенностью 30 % и составляет ,  и .

Сравнительная оценка разности экспериментальных и справочных результатов (в %) рассчитана по формулам

, .  (5)

Результаты измерений, расчетные и табличные значения модулей упругости *Е* и *G*, сравнение экспериментальных данных с табличными представлены в Таблице 1.

*Таблица 1*

**Результаты измерений модулей упругости**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка | Л63 | Д16Т | Д16Т | Стекло К8 | Сталь 40Х13  |
| *d*, мм | 25,043 | 9,888 | 49,980 | 24,531 | 21,178 |
| *СL*, м/с | 4446,8 | 6423,7 | 6397,6 | 6005,8 | 6001,9 |
| *CS*, м/с | 2197,5 | 3086,5 | 3170,4 | 3638,4 | 3298,3 |
| ρ, г/см3 | 8,44 | 2,77 | 2,77 | 2,52 | 7,65 |
| *Ерасч*, ГПа  | 109,10 | 71,24 | 74,46 | 80,74 | 213,66 |
| *Gрасч*, ГПа  | 40,76 | 26,39 | 27,84 | 33,36 | 83,22 |
| ν*расч* | 0,338 | 0,350 | 0,337 | 0,210 | 0,284 |
| δ*Ерасч*, % | 2,27 | 1,61 | 1,57 | 1,43 | 1,55 |
| δ*Gрасч*, % | 0,91 | 0,65 | 0,63 | 0,55 | 0,61 |
| δν*расч* | 0,76 | 0,54 | 0,52 | 0,48 | 0,52 |
| *Eтабл*, ГПа | 116 | 72 | 72 | 80,65 | 214 |
| *Gтабл*, ГПа | 45 | 27 | 27 | 33,36 | 85 |
| νтабл | 0,37 | 0,33 | 0,33 | 0,209 | 0,28 |
| δ*E*, % | -5,9 | -1,0 | 3,4 | 0,1 | -0,2 |
| δ*G*, % | -9,4 | -2,3 | 3,1 | 0,0 | -2,1 |
| δν, % | -8,5 | 6,0 | 2,2 | 0,5 | 1,3 |

Как видно из таблицы 1, относительная погрешность измерений акустическим методом модуля Юнга составляет порядка 2 %, модуля сдвига и коэффициента Пуассона не более 1 % при данной погрешности измерений скоростей УЗ волн.

В целом можно отметить, что результаты измерений модулей упругости достаточно хорошо соответствуют приведенным справочным данным для всех образцов, с учетом как неопределенности самих справочных данных, так и имеющейся зависимости акустических параметров материалов и, соответственно, их физико-механических характеристик от неоднородности свойств различных партий изготовления. Максимальные различия отмечены для латуни Л63, имеющей значительную структурную и акустическую неоднородность (разброс скоростей УЗ волн до ±100 м/с для различных поставок). Наименьшие расхождения получены для оптического стекла марки К8, так как оптические стекла более структурно однородны в сравнении с металлами, а физико-механических характеристики стекол строго регламентированы ГОСТ 13659-78. Очевидно, более перспективным вариантом может быть непосредственное сличение статического и динамического методов на образцах материалов одной поставки.

Согласно методическим указаниям МИ 668-84, при оценке достоверности данных о модулях упругости металлов и сплавов, полученных динамическими методами, расхождения между расчетными и табличными данными могут быть порядка 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают возможность определения модулей упругости материалов динамическим методом с высокой точность на основе прецизионных измерений скоростей распространения продольных и поперечных акустических волн с применением бесконтактных емкостных методов возбуждения и регистрации ультразвука.

В дальнейшем могут быть исследованы и разработаны методы и средства определения физико-механические свойств материалов с использованием динамического акустического метода с целью создания эталонной базы в данной области измерений.

**Л И Т Е Р А Т У Р А**

1. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик // М.: Мир. 1978. 544 с.

2. Методы акустического контроля металлов / Н.П. Алешин, В.Е. Белый, А.Х. Вопилкин и др: под ред. Н.П. Алешина // М.: Машиностроение, 1989. 456 с.

3. Эталонная установка для комплексных измерений акустических параметров твердых сред / В.А. Луговой, С.Л. Снытко, Н.С. Андрианова, В.К. Рудаков // Измерительная техника. 2023. №2. С. 55-62.

4. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И.К. Кикоина.-М., Атомиздат, 1976.-1008 с.

5. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова //М., Энергоатомиздат. 1991. 1232 с.

6. Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов / Под ред. Академика И.Н. Францевича // Киев. Наукова Думка.1982. 286 с.

7. Справочник конструктора [Электронный ресурс] – URL: https://sprav-constr.ru/index.html.