

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛОВ ИМПЕДАНСНЫМ МЕТОДОМ

А. В. Азин✉, **С. В. Пономарев**,
С. В. Рикконен, **А. В. Васильев**

*Национальный исследовательский
Томский государственный университет
г. Томск, Российская Федерация*

Эффективно применяемый импедансный метод неразрушающего контроля для элементов космической техники является сравнительным методом обнаружения дефектов материалов. Однако определение деформационных характеристик материалов, в частности модуля упругости, этим методом затруднительно. Цель работы: расширение возможностей импедансного метода для определения модуля упругости материала. Предложен метод локального динамического воздействия на поверхность материала, в котором возможен анализ составляющих механического импеданса с определением модуля упругости материала. Устройство, реализующее данный метод, представляет собой ультразвуковой излучатель с индентором для контактного воздействия на поверхность исследуемого материала. В конструкцию устройства включены датчики ускорения и силы. Ультразвуковой излучатель при одностороннем доступе к объекту оказывает минимальное силовое воздействие на исследуемый материал, что особенно важно при неразрушающем контроле. Для получения информации о физико-механических характеристиках материала используется частотный диапазон, при котором все сигналы датчиков имеют гармоническую форму. В режиме гармонических колебаний колебательная система «устройство-исследуемый материал» работает как единое целое. Наличие режима гармонических колебаний позволяет при обработке экспериментальных данных о колебательной системе использовать простые математические методы (символический метод анализа систем и правила преобразования электрических цепей) без потери информации об объекте. Предложенный метод позволяет определять модуль упругости материалов в зависимости от частоты механического воздействия с погрешностью не более 10 %.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, модуль упругости, импедансный метод, ультразвуковой излучатель.

Введение

Известно большое число методов определения модуля упругости. Чаще всего используют статические методы определения модуля упругости. Точность статических методов достаточна для технических расчетов, особенно применительно к условиям работы деталей, близким к статическим условиям. Возможности статических методов ограничены, так как для испытаний требуются образцы довольно большого размера и определенной формы [1–5]. Кроме того, для обеспечения достаточной точности необходимы значительные деформации, что относит

статические методы к разрушающим методам контроля.

Преимущества динамических методов испытаний физико-механических характеристик (например, модуля упругости) материалов – их более высокая точность по сравнению со статическими, а также гибкость методики [6], позволяющей проследить на одном и том же образце зависимость модуля упругости материала от различных факторов, в частности от температуры, без значительного силового воздействия [6–8]. К динамическим относятся следующие методы:

– Резонансный метод определения модуля упругости широко распространен при исследованиях зависимости модуля упругости материала от температуры. Собственную частоту колебаний измеряют обычно на стержневых образцах посто-

✉ antonazin@niipmm.tsu.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

янного сечения. В исследуемом образце возбуждаются упругие резонансные колебания и измеряется их резонансная частота. На основе геометрических размеров образца и его плотности определяется значение модуля упругости материала [9].

– Метод измерения скоростей распространения акустических волн (продольных, сдвиговых, поперечных и т.д.). Через соотношение продольных и сдвиговых (поперечных) волн определяются коэффициент Пуассона и модуль упругости материала [10].

– Виброакустический метод. При низких скоростях воздействия можно утверждать, что значения динамического и статического модуля упругости тождественны или отличаются между собой незначительно.

Полезная информация о состоянии колебательной системы (КС) для всех методов неразрушающего контроля (НК) формируется при механическом воздействии на объект, при этом контактное воздействие может деформировать объект исследования, оставлять отпечатки в месте воздействия индентора, нарушать функционирование объекта исследования. Поэтому разработка методов НК с минимальным уровнем воздействия на исследуемый материал является актуальной задачей.

Виброакустическим методом определения физико-механических свойств материалов и НК называют метод, основанный на регистрации, измерении и анализе параметров виброакустических колебаний, возникающих при работе контролируемого объекта [11]. Большинство устройств виброакустической дефектоскопии являются оценочными методами условного размера и дискретной глубины залегания дефектов [11–18]. Определение физико-механических характеристик материалов этими методами вызывает определенные трудности.

Импедансный метод НК называют сравнительным методом контроля, основанным на определении величины механического импеданса. Величина механического импеданса (определяется из отношения величины силы возбуждения

к виброскорости КС) является комплексной величиной и имеет вид (1):

$$Z = F/V = R + j(\omega \cdot M_{\text{пч}} - K/\omega). \quad (1)$$

Модуль механического импеданса определяется из выражения (2):

$$Z = F/V = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot M_{\text{пч}} - K/\omega)^2}, \quad (2)$$

где R – коэффициент диссипации, в кг/с; K – жесткость КС, в Н/м; V – амплитуда виброскорости КС, в м/с; F – сила возбуждения КС, в Н; ω – угловая частота, в 1/с; $M_{\text{пч}}$ – масса подвижных частей ультразвукового (УЗ) излучателя, в кг.

Обычно составляющая диссипации КС составляет доли процента от кинетической и потенциальной энергии системы. Сравнивая величины модуля механического импеданса при разных позициях излучателя, можно определить наличие и размеры дефектов материалов и конструкций [12–17].

Имея дополнительные датчики ускорения и силы в КС, можно анализировать работу отдельных частей КС, контролируя амплитуду и форму вибросмещения подвижных частей.

В КС, в которых сказывается разнообразие нелинейных процессов (наличие подсистем, нелинейность параметров, недостаточная мощность источника питания и т.д.), есть частотные диапазоны, в которых все сигналы датчиков имеют гармоническую форму, что говорит о режиме синхронного и квазисинфазного движения элементов КС – режимы гармонических колебаний (РГК) (рисунок 1а). В РГК КС работает как единое целое, а все сигналы имеют синусоидальную форму. При этом появляется возможность для определения физико-механических характеристик материалов применять упрощенные методики анализа работы КС, приведенные в [12]. Режим РГК будет соответствовать своему диапазону частот, который для этой конструкции КС может не совпадать с резонансом всей системы. Вне режима гармонических

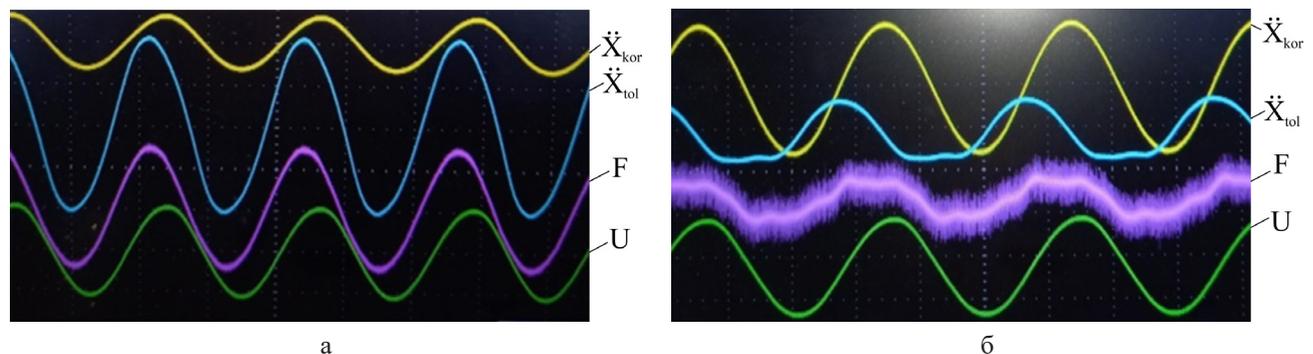


Рисунок 1. Осциллограммы сигналов, характеризующих работу КС УЗ-излучателя:
а – гармонические сигналы с датчиков при частоте $f = 22,3$ кГц и б – негармонический сигнал с датчиков при частоте $f = 17,10$ кГц

колебаний колебания носят негармонический характер (рисунок 1б), и возможности правильно определить физико-механические характеристики резко снижаются. На резонансе увеличение амплитуды колебаний может привести систему в зону «неустойчивой» работы, которая характеризуется несинусоидальностью сигналов датчиков.

1. Методы испытаний

Рассматривается метод локального динамического воздействия на поверхность материала для определения физико-механических характеристик материала пластины в зависимости от частоты воздействия (рисунок 2).

Разработанный метод основан на регистрации величин ускорения элементов КС и силы воздействия непосредственно на нагрузку. В этом случае сам преобразователь электрической мощности в механическую мощность «чувствует» изменение акустического импеданса механической КС в зависимости от физико-механических характеристик исследуемого материала и от состояния конструкции при появлении дефектов [12, 17–21].

На рисунке 2 представлен эскиз УЗ-излучателя резонансного типа. Пьезоактуатор излучателя расположен на одной оси с датчиком силы (ДС), толкателем, с упругим элементом предварительного поджатия и исследуемым объектом (нагрузкой, для случая на рисунке 2б). В конструкции УЗ-излучателя присутствуют датчики для измерения ускорений толкателя и корпуса, силы от пьезоактуатора.

Сигналы (ускорение корпуса, ускорение толкателя) с акселерометров AP10 обрабатывались на предварительном усилителе ZET 440 фирмы ZETLAB. ДС пьезоактуатора представляет собой предварительно прокалиброванный пьезоактуатор.

На осциллографе GDS-72104E фирмы GW Instek снимаются сигналы: $\ddot{X}_{кор}$ – ускорение корпуса; $\ddot{X}_{тол}$ – ускорение толкателя; F – сила, развиваемая пьезоактуатором; $U_{пит}$ – питающее напряжение пьезоактуатора.

Коэффициенты преобразования сигналов датчиков в физические величины приведены в таблице 1.

Экспериментальные исследования по определению модуля упругости образцов из материала

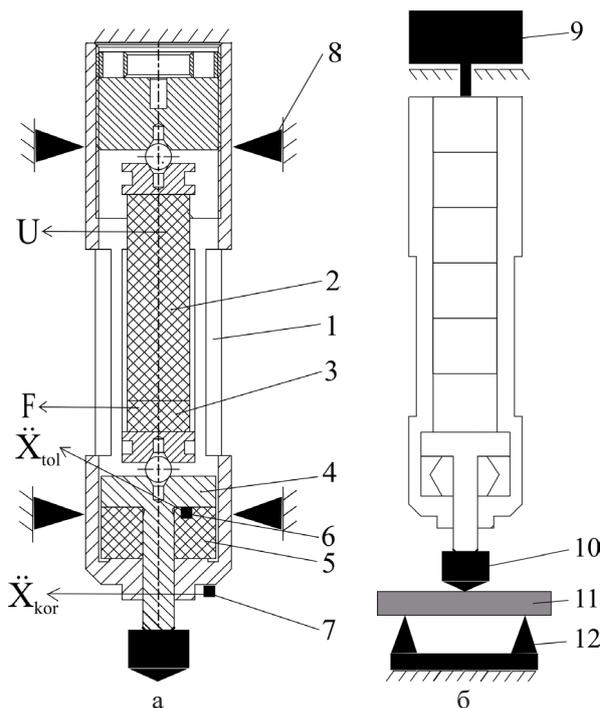


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки исследования работы УЗ-излучателя: а – случай КЗ; б – случай с нагрузкой в виде образца материала, расположенного на двух опорах; 1 – корпус, 2 – пьезоактуатор АПМ-2-7, 3 – ДС, 4 – толкатель, 5 – упругий элемент предварительного поджатия, 6 – датчик ускорения толкателя (индентора), 7 – датчик ускорения корпуса, 8 – направляющие, 9 – пригруз, 10 – индентор, 11 – образец, 12 – опоры

дюралюминия при статической нагрузке проводились на испытательной машине Instron 5948 MicroTester в соответствии с ГОСТ 1497 [1].

Для экспериментальных исследований изготовлены образцы из дюралюминия (для УЗ-излучателя: образец в форме пластинки, размером 30x15x1,85 мм, в количестве 5 шт.; для Instron 5948 MicroTester: образец в форме лопатки, в соответствии с ГОСТ 1497, в количестве 10 шт.) и из полиметилметакрилата (ПММА) (образец в форме пластинки, размером 30x15x2,6 мм, в количестве 5 шт.).

Кроме основного режима работы УЗ-излучателя (рисунок 2а) возможны два особых режима работы:

Таблица 1

Коэффициенты преобразования сигналов датчиков в физические величины

Наименование датчика	Обозначение	Коэффициент преобразования
Ускорение корпуса	$\ddot{X}_{кор}$	0,174 мВ/м/с ²
Ускорение толкателя	$\ddot{X}_{тол}$	0,231 мВ/м/с ²
Сила пьезоактуатора	F	3,54 мВ/Н

– режим холостого хода (ХХ), когда пьезоактуатор полностью зажат и вибросмещение равно нулю;

– режим короткого замыкания (КЗ), когда пьезоактуатор свободен и вибросмещение максимальное, а сила на нагрузки равна нулю.

2. Алгоритм применения предлагаемого метода

В результате исследования работы УЗ-излучателя в режиме КЗ, проводимого в соответствии со схемой на рисунке 2а, определяется диапазон частот, при котором все элементы КС УЗ-излучателя движутся синхронно – режим гармонических колебаний. На основе анализа экспериментальных данных строятся АЧХ ускорения толкателя и силы пьезоактуатора УЗ-излучателя (рисунки 3 и 4).

Учитывая выражение (2), модуль механического импеданса без учета R и с переходом от вибро-

скорости к виброускорению при $V = \ddot{X}/\omega$ имеет вид (3):

$$Z = (F \cdot \omega) / \ddot{X} = \omega \cdot M_{\text{пч}} - K / \omega. \quad (3)$$

Сокращая левую и правую части выражения (3) на общий член ω , получаем (4):

$$F / \ddot{X} = M_{\text{пч}} - K / \omega^2. \quad (4)$$

Жесткость КС определяется из выражения (4):

$$K_{\text{сис}} = \omega^2 (M_{\text{пч}} - F / \ddot{X}), \quad (5)$$

где \ddot{X} – амплитуда ускорения индентора КС, в м/с²; $M_{\text{пч}}$ – масса подвижных частей УЗ-излучателя, в кг. На основе анализа работы УЗ-излучателя в режиме КЗ определяется жесткость конструкции УЗ-излучателя.

Предполагается, что

$$K_{\text{сис}} = K_{\text{об}} + K_{\text{кз}}, \quad (6)$$

где $K_{\text{об}}$ – жесткость испытываемого образца, в Н/м; $K_{\text{кз}}$ – жесткость УЗ-излучателя в режиме КЗ, в Н/м.

$$M_{\text{сис}} = M_{\text{об}} + M_{\text{кз}}, \quad (7)$$

где $M_{\text{кз}}$ – масса подвижных частей УЗ-излучателя в режиме КЗ, в кг; $M_{\text{об}}$ – масса испытываемого образца, в кг.

Параметры КС в режиме КЗ определяются по АЧХ КЗ УЗ-излучателя:

1. Выбирается частота в диапазоне РГК КС УЗ-излучателя – f , в Гц.

2. По экспериментальным характеристикам определяется значение виброускорения КС УЗ-излучателя для частоты $f - \ddot{X}$, в м/с².

3. По экспериментальным характеристикам ДС находится значение амплитуды силы пьезоактуатора для частоты $f - F$, в Н.

4. Жесткость УЗ-излучателя $K_{\text{кз}}$ определяется из эксперимента на его статическое сжатие на универсальной испытательной машине, например Instron 5948.

Масса $M_{\text{пч}}$ при режиме КЗ рассчитывается из выражения (4).

Алгоритм определения модуля упругости образца (схема испытания приведена на рисунке 2б):

1. Выбирается частота в диапазоне РГК КС УЗ-излучателя – f , в Гц.

2. По экспериментальным характеристикам определяется значение виброускорения КС УЗ-излучателя для частоты $f - \ddot{X}$, в м/с².

3. По экспериментальным характеристикам ДС находится значение амплитуды силы пьезоактуатора для частоты $f - F$, в Н.

4. Допускаем $M_{\text{кз}} = M_{\text{пч}}$ при частоте f . Тогда жесткость образца определяется из выражения:

$$K_{\text{об}} = K_{\text{сис}} - K_{\text{кз}}, \quad (8)$$

и модуль упругости материала образца равен:

$$E = K_{\text{об}} \cdot \Psi(h, l, b), \quad (9)$$

где Ψ – функция, определяемая решением контактной задачи взаимодействия индентора с поверхностью образца и его закреплением; l , b , h – геометрические размеры исследуемого образца материала.

В случае если образец опирается на две опоры и представляет собой классическую однопролетную двухконсольную балку, для расчета модуля упругости образца применимо инженерное соотношение из [22]:

$$E = K_{\text{об}} \cdot l^3 / (4 \cdot h^3 \cdot b), \quad (10)$$

где l – расстояние между опорами, b – ширина и h – толщина исследуемого образца материала.

3. Экспериментальные исследования образцов дюралюминия

В результате проведенных экспериментальных исследований определен РГК для КС УЗ-излучателя в режиме КЗ (рисунки 3 и 4). РГК для данной КС лежит в диапазоне частот 21,8–22,5 кГц.

Эксперимент по определению модуля упругости образца проводился в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2б. В соответствии с приведенным ранее алгоритмом определен модуль упругости материала образцов из дюралюминия $E_{\text{ал}} = 59$ ГПа.

Погрешность определения жесткости образца не превышала 10 %. Соответственно, при данной

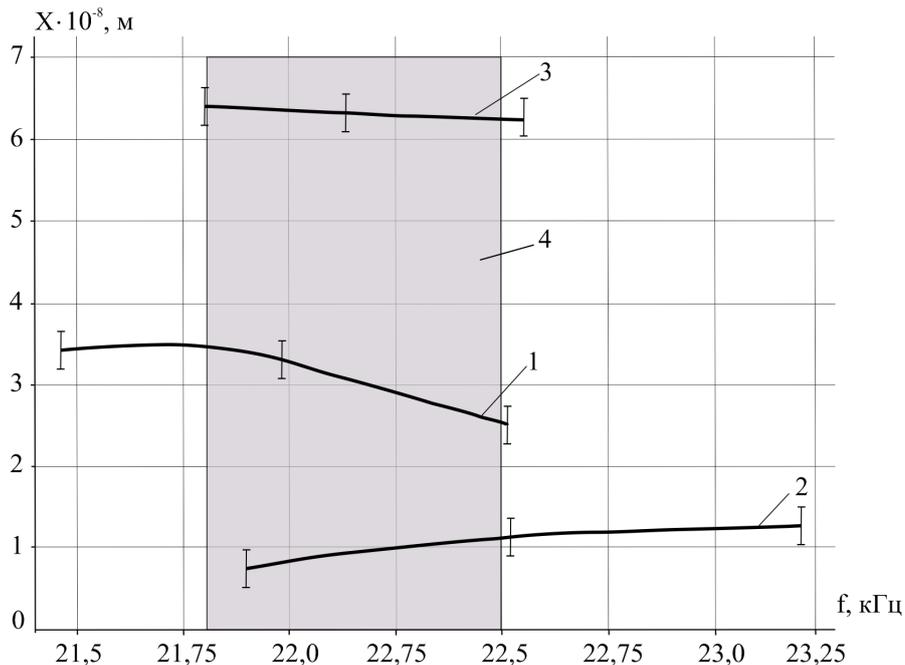


Рисунок 3. Экспериментальные зависимости вибросмещений работы КС: 1 – режим КЗ, 2 – образец дюралюминия, 3 – образец ПММА, 4 – диапазон частот РГК

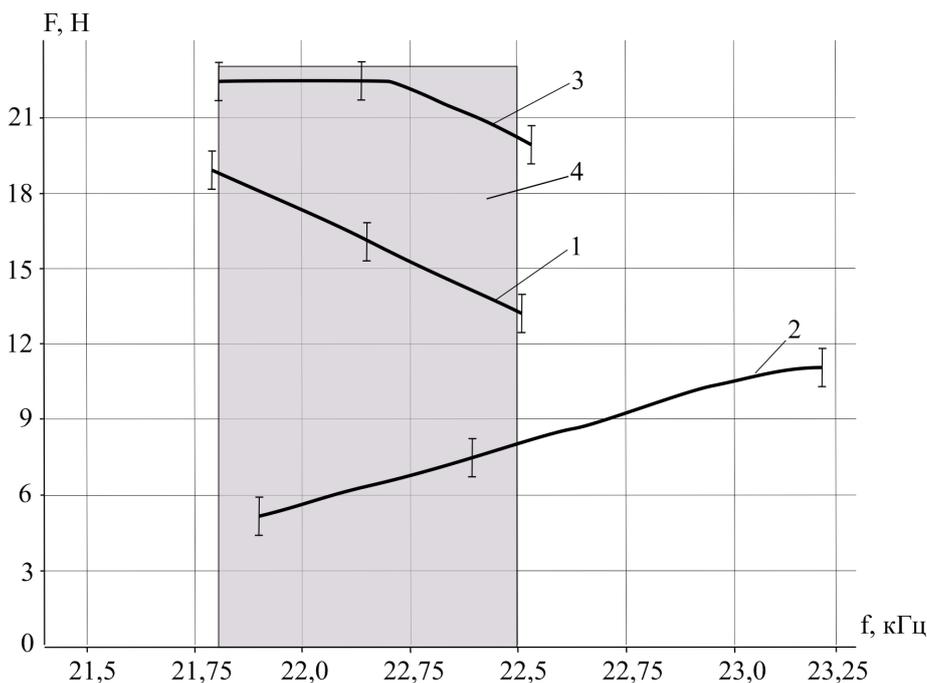


Рисунок 4. Экспериментальные зависимости силы при работе КС: 1 – режим КЗ, 2 – образец дюралюминия, 3 – образец ПММА, 4 – диапазон частот РГК

погрешности наиболее вероятное значение модуля упругости находится в диапазоне от 53 до 65 ГПа.

Энергия КС в зависимости от частоты питающего напряжения рассчитывается по формуле.

$$W_{\text{сис}} = F \cdot X / 2. \tag{11}$$

Эксперименты позволяют говорить о малом энергетическом воздействии УЗ-излучателя на объект исследования. Амплитуда энергии в ди-

апазоне гармонических сигналов лежит в пределах – $4 \cdot 10^{-8}$ Дж. Испытуемый образец при такой энергии воздействия за время эксперимента 30–60 секунд нагреться не успевает.

Для проверки результатов предлагаемого метода дополнительно проведены испытания образцов растяжением из дюралюминия для определения модуля упругости материала на испытательной машине Instron 5948. По результатам экспериментов модуль упругости дюралюминия

составил 63 ГПа. Отклонение значения модуля упругости образцов дюралюминия, определенно по предлагаемому методу, от значения модуля упругости, определенного по ГОСТ 1497, не превышает 7 %.

4. Экспериментальные исследования образцов из ПММА

Модуль упругости исследуемых образцов определен классическим методом упругой деформации изгиба при статическом воздействии. Пластины прямоугольного сечения из исследуемого ПММА жестко зажаты с одной стороны и представляют собой консольную балку. Нагружение свободного конца консольной балки постоянной силой произведено в диапазоне упругой деформации материала. В условиях равновесия определен максимальный прогиб пластин под действием приложенной силы, который характеризует жесткость конструкции и упругие свойства материала согласно закону Гука.

В соответствии с (10) определен модуль упругости ПММА при статическом нагружении пластины толщиной 2,6 мм, равный 3,27 ГПа. В соответствии с информацией, приведенной в [22], значение модуля упругости ПММА находится в диапазоне от 2 до 4 ГПа. Жесткость образца при статической нагрузке равна $K = 5 \cdot 10^5$ Н/м.

Экспериментальные данные, полученные при динамическом нагружении, показывают увеличение значений жесткости и модуля упругости ПММА за счет изменения свойств материала относительно их значений при статическом нагру-

жении. Так, увеличение жесткости и модуля упругости материала ПММА с повышением частоты динамического воздействия от 0,3 до 1 кГц подтверждается исследованием [10].

Рост значения модуля упругости до 5 ГПа при высокоскоростной деформации в случае ударно-волнового деформирования ПММА отмечен в исследовании [6]. Используя данные статьи [6], определен модуль упругости образца из ПММА при частоте 22,2 кГц (скорость деформации $V_\varepsilon = 2,1$ с⁻¹), он составляет 5 ГПа.

В соответствии с приведенным ранее алгоритмом определен модуль упругости материала образцов ПММА $E = 5,1$ ГПа.

По результатам проведенных экспериментальных исследований и информации из сторонних источников составлена зависимость модуля упругости материала ПММА от частоты механического воздействия (рисунок 5).

Заключение

В работе представлен метод локального динамического воздействия на поверхность материала для определения физико-механических характеристик материалов. Энергия механического воздействия на исследуемый образец имеет порядок 10^{-8} Дж, что говорит о низком уровне воздействия УЗ-излучателя на исследуемый образец.

На основе проведенных экспериментальных исследований на образцах дюралюминия и ПММА выявлен интервал частот, где временные зависимости силы, ускорения и питающего напряжения являются гармоническими функциями, что позволяет применять известные простые методы

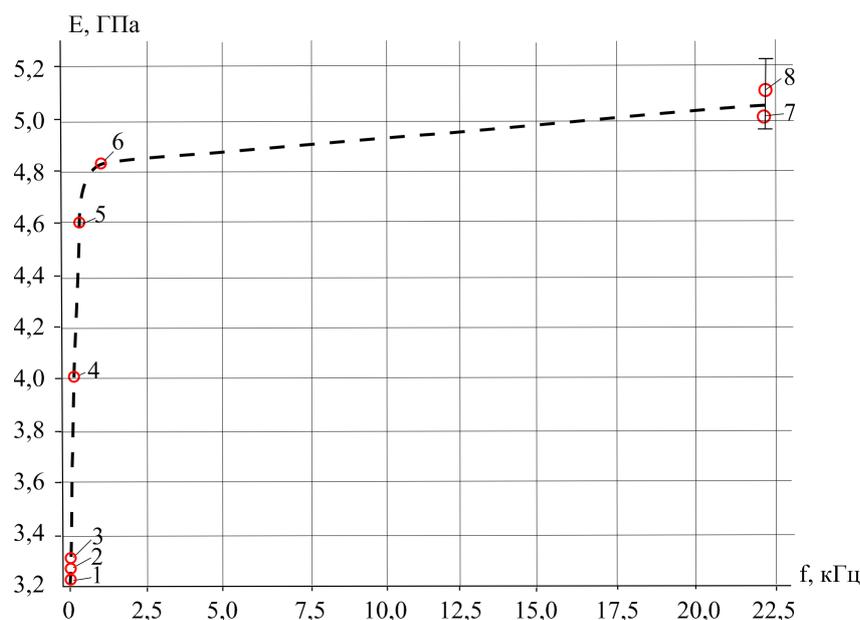


Рисунок 5. Зависимость модуля упругости ПММА от частоты механического воздействия.

Точки на кривой: 2 и 8 – результаты проведенных экспериментальных исследований; 1 и 3–7 – результаты сторонних исследований [3–7, 10] (1 – [3,5], 3–[4], 4 – [7], 5 и 6 – [10], 7 – [6])

обработки без сложной аппаратуры и существенной потери информации.

Разработанный метод позволяет определять модуль упругости материалов в зависимости от частоты механического воздействия с погрешностью не более 10 %.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2020-0036).

Список литературы

- [1] ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытания на растяжение. М., 2008. 24 с.
- [2] Judawisastra H. et al. Определение модуля упругости термопластичных полимеров с помощью ультразвукового импульсно-эхографического метода // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. 2019. Т. 547. № 012047. 11 с. DOI:10.1088/1757-899X/547/1/012047.
- [3] Zhang et al. Моделирование молекулярной динамики и эксперимент по анализу механических свойств композитов ПММА/SiO₂ на основе межфазного взаимодействия // AIP Advances. 2023. Т. 13. № 085311. 7 с. DOI: 10.1063/5.0148636
- [4] Свойства полистироловых и поли(метилметакрилатных) (ПММА) микросфер [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bangslabs.com/material-properties-polystyrene-and-polymethyl-methacrylate-pmma-microspheres>. (дата обращения: 15.10.2024).
- [5] Кухлинг Х. Справочник по физике: М.: Мир, 1982. 520 с.
- [6] Мержиевский Л. А., Воронин М. С. Моделирование ударно-волнового деформирования полиметилметакрилата // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 2. С. 113–123.
- [7] Abdel-wahab A. A., Ataya S., Silberschmidt V.V. Механическое поведение ПММА в зависимости от температуры: экспериментальный анализ и моделирование // Тестирование полимеров. 2017. Т. 58. С. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting>
- [8] Модель деформирования и разрушения ПММА [Электронный ресурс]. URL: <https://pandia.ru/text/78/179/54531.php> (дата обращения: 15.10.2024).
- [9] ГОСТ Р 56803–2015. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. М.: 2016. 3. 13 с. (Колебания изгиба. Метод резонансной кривой).
- [10] Определение коэффициента Пуассона и модуля упругости с помощью датчиков Р- и S-волн [Электронный ресурс]. URL: <https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Determining%20Poissons%20ratio%20and%20Elastic%20modulus.pdf>. (дата обращения: 15.10.2024).
- [11] Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинг машин: Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 360 с.
- [12] Азин А. В. и др. Настройка резонансных режимов работы ультразвукового излучателя при одностороннем доступе к объекту // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 10. С. 199–209.
- [13] Акустический импедансный преобразователь: а.с. 1629838, СССР. № 4670342/28; заявл. 30.03.89; опубл. 23.02.91, Бюл. № 7. 2 с.
- [14] Совершенствование методов ультразвуковой дефектоскопии многослойных конструкций воздушных судов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=605793>. (дата обращения: 15.10.2024).
- [15] Мурашов В. В. Применение ультразвукового резонансного метода для выявления дефектов клееных конструкций // Испытания материалов. Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-88-94.
- [16] Чертищев В. Ю. и др. Определение размера глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса // Испытания материалов. Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3 (60). С. 72–94.
- [17] Хмелев В. Н. и др. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. № 1. С. 148–157.
- [18] Азин А. В. и др. Математическое моделирование ультразвукового излучателя резонансного типа для подготовки высоковязкой нефти к транспорту // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 11. С. 161–169. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3433.
- [19] Азин А. В., Богданов Е. П., Рикконен С. В. Моделирование передачи акустической энергии через многослойную систему для измерения реологических свойств углеводородов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 3. С. 186–196. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3953.
- [20] Рикконен С. В., Пономарев С. В., Азин А. В. Моделирование колебательных процессов пьезоэлектрического преобразователя // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2015. № 29(34). С. 86–95. DOI: 10.17223/19988621/34/8.

- [21] Панич А. Е. Пьезокерамические актюаторы. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. 159 с.
[22] ГОСТ 10667–90. Стекло органическое листовое. М., 1990. 35 с. (Технические условия).

DETERMINATION OF THE ELASTIC MODULUS OF MATERIALS BY THE IMPEDANCE METHOD

**A. V. Azin, S. V. Ponomarev,
S. V. Rikkonen, A. V. Vasilyev**

*Tomsk State University
Tomsk, The Russian Federation*

The impedance method is widely used for non-destructive testing of structural elements of space technology. However, this method is not used to determine the physical and mechanical characteristics of materials. The aim of the work is to expand the capabilities of the impedance method for determining the modulus of material elasticity. A method of local dynamic action on the surface of the material is proposed. This method contains an algorithm for analyzing the components of mechanical impedance to determine the elastic modulus of a material. To implement the proposed method, an ultrasonic emitter with an indenter is used for contact action on the surface of the material under study. The ultrasonic emitter contains acceleration and force sensors. To obtain information about the physical and mechanical characteristics of the material, a certain frequency range is used. The frequency range is determined from the condition – all signals of the ultrasonic emitter sensors have a harmonic shape. This condition allows us to use simple mathematical methods for processing experimental data (symbolic method of system analysis and rules for converting electrical circuits) without losing information about the object. The proposed method makes it possible to determine the elastic modulus of materials depending on the frequency of mechanical impact with an error of no more than 10 %.

Keywords: non-destructive testing, elastic modulus, impedance method, ultrasonic emitter.

References

- [1] GOST 1497–84. Metals. Methods of tension test. М., 2008. 24 p.
[2] Judawisastra H. et al. Elastic Modulus Determination of Thermoplastic Polymers with Pulse-Echo Method Ultrasonic Testing // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng, 2019. Vol. 547, no. 012047, 11 p. DOI:10.1088/1757-899X/547/1/012047.
[3] Zhang et al. Molecular dynamics simulation and experiment on analyzing mechanical properties of PMMA/SiO₂ composites based on interfacial interaction // AIP Advances, 2023. Vol. 13, no. 085311, 7 p. DOI: 10.1063/5.0148636.
[4] Material Properties of Polystyrene and Poly (methyl methacrylate) (PMMA) Microspheres. Available at <https://www.bangslabs.com/material-properties-polystyrene-and-polymethyl-methacrylate-pmma-microspheres>. (Accessed: 15.10.2024).
[5] Kuchling H. Physik. Veb Fachbuchverlag Leipzig, 1980. 520 p.
[6] Merzhievskii L.A., Voronin M.S. Modeling of shock-wave deformation of polymethyl methacrylate // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2012. Vol. 48, issue № 2, pp.113–123.
[7] Abdel-wahab A. A., Ataya S., Silberschmidt V.V. Temperature-dependent mechanical behavior off PMMA: Experimental analysis and modeling // PolymerTesting, 2017. Vol. 58, pp. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting>.
[8] Model of deformation and destruction of PMMA. Available at <https://pandia.ru/text/78/179/54531.php> (Accessed: 15.10.2024).
[9] GOST R 56803–2015. Plastics. Determination of dynamic mechanical properties. М.: 2016. 3. 13 p. (Flexural vibration. Resonance-curve method).

- [10] Determination of Poisson's Ratio and the Modulus of Elasticity by measuring with P-and S-wave transducers. Available at <https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Determining%20Poissons%20ratio%20and%20Elastic%20modulus.pdf>. (Accessed: 15.10.2024).
- [11] Kostyukov V.N, Naumenko A. P. Basics of vibroacoustic diagnostics and machine monitoring. Omsk: Omsk State Technical University Publishing House, 2011. 360 p.
- [12] Azin A. V. et al. Configurations of ultrasonic emitter resonance modes for unilateral access to an object. // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 334, 10, pp. 199–209. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/10/4346>.
- [13] Acoustic impedance converter: inventor's certificate № 1629838, USSR. Application: 4670342/28, 30.03.89; date of publication: 23.02.91, Bull. № 7. 2 p.
- [14] The improvement of ultrasonic flaw detection techniques for multilayer aircraft structures. Available at: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=605793>. (Accessed: 15.10.2024).
- [15] Murashov V.V. Application of the ultrasonic resonance method for detection of defects of glued constructions // Aviation materials and technologies, 2018, 1 (50), pp. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-88-94.
- [16] Chertishchev V. Yu. et al. Determination of the size and depth of defects in multilayer PCM honeycomb structures based on the mechanical impedance value // Aviation materials and technologies, 2020. Vol. 3(60), pp. 72–94.
- [17] Khmelev V.N. et al. Design of piezoelectric ultrasonic vibratory systems for intensification of processes into gaseous mediums // Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki, 2010. Vol. 1. pp. 148–157.
- [18] Azin A. V. et al. Mathematical modeling of a resonant-type ultrasonic emitter for preparing high-viscosity oil for transport // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2021. Vol. 332, issue 11, pp. 161–169. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3433.
- [19] Azin A. V., Bogdanov E. P., Rikkonen S. V. Simulation of acoustic energy transfer through a multilayer system for changing the rheological properties of hydrocarbons // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2023. Vol. 334, issue 3, pp. 186–196. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3953.
- [20] Rikkonen S. V., Ponomarev S. V., Azin A. V. Simulation of oscillatory processes in a piezoelectric transducer // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics, 2015. Vol. 29(34), pp.86–95. DOI: 10.17223/19988621/34/8.
- [21] Panich A. E. Piezoceramic actuators. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press, 2008. 159 p.
- [22] GOST 10667–90. Sheet organic glass. M., 1990. 35 p. (Specifications).

Сведения об авторах

Азин Антон Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Окончил Томский государственный университет в 2010 году. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, космическая техника.

Пономарев Сергей Васильевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Окончил Томский государственный университет в 1971 году. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, космическая техника.

Рикконен Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Окончил Томский политехнический институт в 1973 году. Область научных интересов: электромеханика, разработка вибро- и пьезоприводов, реология нефти, механика деформируемого твердого тела.

Васильев Александр Викторович – аспирант Томского государственного университета. Окончил Томский государственный университет в 1999 году. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, космическая техника.