

$$u_E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial c}\right)^2 \cdot u_c^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \rho}\right)^2 \cdot u_\rho^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \mu}\right)^2 \cdot u_\mu^2}, \quad (2)$$

де u_c – невизначеність швидкості поширення пружних хвиль у досліджуваному зразку; u_ρ – невизначеність вимірювання густини матеріалу зразка; u_μ – невизначеність коефіцієнту Пуассона зразка матеріалу; $\frac{\partial E}{\partial c}$, $\frac{\partial E}{\partial \rho}$, $\frac{\partial E}{\partial \mu}$ – відповідні коефіцієнти впливу невизначеностей.

Таблиця 1

Бюджет складових невизначеності

Позначення	Величина	Тип оцінювання величини
E	Модуль пружності	розрахункова
c	Швидкість проходження пружної хвилі в зразку	розрахункова
μ	Коефіцієнт Пуассона зразка	розрахункова
μ₀	Коефіцієнт Пуассона титану	довідкові дані (тип В)
ρ_{експ}	Густина зразка	розрахункова
ρ_{теор}	Густина титану	довідкові дані (тип В)
θ	Пористість зразка	розрахункова
h	Висота зразка	вимірювана (тип А)
R_z	Шорсткість поверхні зразка	розрахункова
a	Плоскопаралельність зразка	розрахункова
T⁰	Температура проведення експерименту	вимірювана (тип А)
t	Час проходження пружної хвилі в зразку	вимірювана (тип А)
η	Девіація притиснення зразка	розрахункова
V	Об'єм зразка	вимірювана (тип А)
m	Вага зразка	вимірювана (тип А)

Таблиця 2

Невизначеності для вимірювання модулю пружності

Позначення невизначеності	Тип оцінювання невизначеності	Коефіцієнт впливу невизначеності
u_c	комбінована	$\frac{\partial E}{\partial c} = K_c = 2 \cdot c \cdot \rho \cdot (1 + \mu) \cdot \frac{(1 - 2 \cdot \mu)}{(1 - \mu)}$
$u_{\rho_{експ}}$	комбінована	$\frac{\partial E}{\partial \rho_{експ}} = K_{\rho_{експ}} = c^2 \cdot (1 + \mu) \cdot \frac{(1 - 2 \cdot \mu)}{(1 - \mu)}$
u_μ	комбінована	$\frac{\partial E}{\partial \mu} = K_\mu = c^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 - 2 \cdot \mu)}{(1 - \mu)} - 2 \cdot c^2 \cdot \rho \times \frac{(1 + \mu)}{(1 - \mu)} + c^2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu) \cdot \frac{(1 - 2 \cdot \mu)}{(1 - \mu)^2}$

В табл. 2 наведено тип та розрахункові формули для визначення коефіцієнтів впливу для кожної складової сумарної невизначеності.

Як видно з таблиці невизначеності для вимірювання модулю пружності – комбіновані, тому потрібно проаналізувати кожну невизначеність окремо.

Невизначеність u_c , обумовлена неточністю вимірювання швидкості поширення пружної хвилі (ПХ) у зразку.

Швидкість розповсюдження ПХ у зразку визначається за формулою:

$$c = \frac{h}{t - t_0}, \quad (3)$$

де h – висота зразка; t – час поширення пружної хвилі у зразку; t_0 – час розповсюдження пружних хвиль в призмах перетворювачів.

Відповідно, комбінована невизначеність, обумовлена неточністю вимірювання швидкості поширення пружної хвилі у зразку має вигляд:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial h}\right)^2 \cdot u_h^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)^2 \cdot u_t^2}, \quad (4)$$

де u_h – невизначеність вимірювання висоти зразка; u_t – невизначеність вимірювання часу поширення пружної хвилі у зразку.

В табл. 3 зведені типи складових комбінованої невизначеності для вимірювання швидкості поширення пружної хвилі у зразку.

Таблиця 3

Невизначеності вимірювання швидкості поширення пружної хвилі у зразку

Позначення невизначеності	Тип оцінювання невизначеності	Коефіцієнт впливу невизначеності
u_h	комбінована	$\frac{\partial c}{\partial h} = K_h = \frac{1}{t}$
u_t	комбінована	$\frac{\partial c}{\partial t} = K_t = -\frac{h}{t^2}$

Невизначеність вимірюванням висоти зразка u_h залежить від плоскопаралельності поверхні a (невизначеність u_a), інструментальної невизначеності мікрометра $u_{мікр}$ та невизначеності обумовленою шорсткістю R_z поверхонь зразка.

Комбінована невизначеність, обумовлена неточністю вимірювання висоти зразка матиме вигляд:

$$u_h = \sqrt{u_{мікр}^2 + u_a^2}. \quad (5)$$

Похибка мікрометра розподілена за рівномірним законом розподілу ймовірностей і дорівнює значенню $\pm \Delta h$, тоді інструментальна невизначеність мікрометра.

$$u_{мікр} = \frac{\Delta h}{\sqrt{3}}. \quad (6)$$

Непаралельність поверхонь ОК викликає зменшення донного сигналу й зміну шляху пружної хвилі в ОК і призмах перетворювача, що відповідають максимальній амплітуді максимального луна-сигналу. Результат вимірювання відповідає середньому значенню товщини на ділянці акустичного контакту перетворювача з ОК. однак точність вимірювання знижується завдяки зменшенню крутості фронту донного сигналу. Для того, щоб розрахувати цю похибку потрібно виміряти висоту зразка h у чотирьох точках та розрахувати СКВ для кожного зразка за формулою 7.

$$c_a = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^4 (h_i - \bar{h})^2}, \quad (7)$$

де \bar{h} – середнє значення; h_i – значення в кожній точці.

Товщина контактної шару (шару рідини) змінюється через різну шорсткість поверхні ОК і різний ступінь притиснення перетворювача при настроюванні приладу й вимірюваннях швидкості пружної хвилі. Перетворювач при цьому опирається на найбільш високі нерівності. У результаті похибка стає випадковою. Для зменшення похибки від зміни товщини контактної шару (особливо істотної при проведенні вимірювань на зразках малих розмірів) підвищують вимоги до чистоти поверхні ОК, стабілізують притиснення перетворювача за допомогою притискного пристрою, виконують налаштування приладу й вимірювання на зразках з однакової шорсткістю поверхні.

Зразки для досліджень мали достатню чистоту поверхні (R_z20 і краще) та приблизно однакову шорсткість, тому невизначеністю обумовленою шорсткістю поверхні можна знехтувати.

На похибку часу проходження пружної хвилі c_t впливає температура навколишнього середовища T^0 , девіація притиснення п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП) зразка η та метод вимірювання часу поширення ПХ у зразку.

Швидкість ПХ в зразку змінюється в залежності від температури, зазвичай збільшуючись при охолодженні та зменшуючись при нагріванні. Змінюється також швидкість звуку в матеріалі перетворювача. Для виключення цієї похибки прилад повинен забезпечувати вимірювання часу пробігу імпульсу між поверхнями ОК і не включати в зазначений інтервал час пробігу в призмах і інших акустичних затримках.

Дослідження проводились в лабораторних умовах при підтриманні температури в межах 20 ± 2 , тому температурним впливом на швидкість поширення ПХ можна знехтувати.

При нестійкому положенні ПЕП луна-сигнали спотворюються, що також приводить до неточних показів. В таких випадках зручно використовувати

пружинний V-подібний тримач, який нормує притиск і створює правильну орієнтацію ПЕП до поверхні приладу.

Невизначеність від девіації притиснення зразка входить в інструментальну невизначеність часу поширення ПХ у зразку.

Похибка затримки імпульсу в електричних колах системи приведе до виникнення систематичної похибки при вимірюванні швидкості. При ретельному налаштуванні системи Δt_s можна знехтувати порівняно з похибкою вимірювання часу Δt .

Похибка вимірювання часу Δt складається з похибок Δt_n обумовлених впливом двох факторів, а саме:

похибки вимірювального пристрою;

похибки, пов'язаної з кінцевою тривалістю ультразвукового імпульсу.

Похибка вимірювального пристрою складається з похибки від нелінійності часових розгортки і обмеженої точності індикаторного пристрою. У сумі вона не перевищує $0,05 \dots 0,1\%$.

Похибка, пов'язана з кінцевою тривалістю ультразвукового імпульсу, пропорційна періоду коливань (рис. 2). Вона дорівнює $\Delta t_s = kT/2$, де T – період коливань. Якщо не прийняти спеціальних заходів, то в результаті дії випадкових факторів відлік часу при двох вимірюваннях (при настроюванні й властиво вимірюванні часу проходження пружної хвилі) може бути виконаний по двох різних періодах коливань.

У цьому випадку $k = 1$ (для приладу із двухполуперіодним випрямлячем $k = 0,5$).

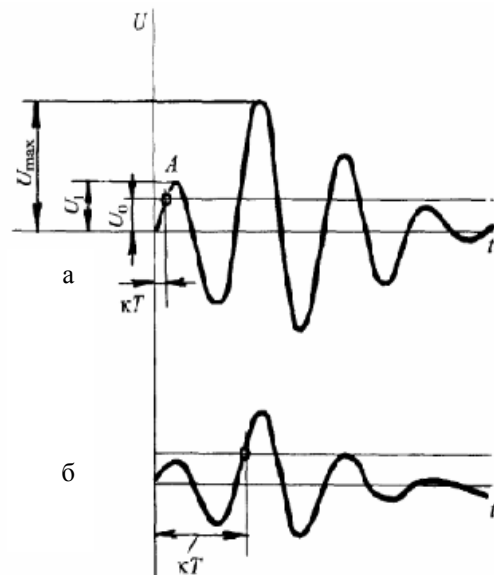


Рис. 2. Вплив тривалості імпульсу і його фронту на точність вимірювання часу пробігу: а – нормальний режим вимірювання $k \leq 0,25$; б – вимірювання імпульсів малої амплітуди $k \geq 1$

Щоб уникнути виникнення більших похибок, частіше всього вимірювання проводять по фронту

першого періоду коливань або по фронту другого напівперіоду (випрямляч роблять двухполуперіодним).

Для забезпечення виконання цієї умови амплітуду імпульсу u_t (рис. 2, а) підтримують постійною, а вимірювання виконують на постійно рівні u_0 .

Невизначеність, обумовлена вимірювання часу проходження ПХ у зразку має вигляд:

$$u_t = \sqrt{u_{t_i}^2 + u_{\Delta}^2}, \quad (8)$$

де u_{Δ} – невизначеність, обумовлена методом вимірювання часу проходження ПХ у зразку; u_{t_i} – це СКВ багаторазового вимірювання часу проходження ПХ в одній точці зразка:

$$u_{t_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}, \quad (9)$$

де \bar{t} – середнє значення; t_i – значення в кожній точці; n – кількість вимірювань.

Щоб оцінити невизначеність, обумовлену методом вимірювання часу проходження ПХ у зразку, оцінимо значення $\Delta t_{\text{сум}}$ – похибку методу вимірювання часу проходження ПХ у зразку.

$$\Delta t_{\text{сум}} = \Delta t_1 + \Delta t_2, \quad (10)$$

Δt_1 – похибка вимірювального приладу:

$$\Delta t_1 = \frac{0.1\% \cdot t_{\text{вим}}}{100}, \quad (11)$$

де $t_{\text{вим}}$ – виміряне значення часу проходження ПХ у зразку;

Δt_2 – похибка, обумовлена частотою дискретизації:

$$\Delta t_2 = \frac{1}{f}, \quad (12)$$

де f – частота дискретизації

Похибка методу вимірювання часу проходження ПХ у зразку розподілена за нормальним законом розподілу ймовірностей, тому відповідний квантіль нормального розподілу, при довірчій ймовірності 0,95, буде дорівнювати 1,96

$$u_{\Delta} = \frac{\Delta t_{\text{сум}}}{1.96}. \quad (13)$$

Невизначеність $u_{\text{рексп}}$, обумовлена визначенням експериментального значення густини.

Густина досліджує мого зразка визначається за формулою:

$$\rho_{\text{рексп}} = \frac{m}{V}. \quad (14)$$

Комбінована невизначеність складається з невизначеностей вимірювань ваги u_m та об'єму зразка u_v :

$$u_{\rho_{\text{рексп}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{\text{рексп}}}{\partial m}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial \rho_{\text{рексп}}}{\partial V}\right)^2 \cdot u_v^2}. \quad (15)$$

В табл. 4 наведені типи складових невизначеностей та їхні коефіцієнти впливу.

Таблиця 4

Невизначеності вимірювання густини зразка

Позначення невизначеності	Тип оцінювання невизначеності	Коефіцієнт впливу невизначеності
u_m	В	$\frac{\partial \rho_{\text{рексп}}}{\partial m} = K_m = \frac{1}{V}$
u_v	комбінована	$\frac{\partial \rho_{\text{рексп}}}{\partial V} = K_v = -\frac{m}{V^2}$

Невизначеність обумовлена вимірюванням ваги (для рівномірного закону розподілу ймовірності):

$$u_m = \frac{\Delta m}{\sqrt{3}}, \quad (16)$$

де Δm – абсолютна похибка вагів.

Об'єм визначається за формулою:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h, \quad (17)$$

де d – діаметр зразка.

Невизначеність вимірювання об'єму складається з невизначеності вимірювання висоти та діаметру (зразка – циліндричної форми) та має вигляд:

$$u_v = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial d}\right)^2 \cdot u_d^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h}\right)^2 \cdot u_h^2}. \quad (18)$$

Табл. 5 містить типи складових невизначеностей та їхні коефіцієнти впливу.

Таблиця 5

Невизначеності вимірювання об'єму зразка

Позначення невизначеності	Тип оцінювання невизначеності	Коефіцієнт впливу невизначеності
u_d	В	$\frac{\partial V}{\partial d} = K_d = 3.14 \cdot d \cdot h$
u_h	А	$\frac{\partial V}{\partial h} = K_h = 1.57 \cdot d^2$

Невизначеність для діаметру u_d (для рівномірного закону розподілу ймовірності):

$$u_d = \frac{\Delta h}{\sqrt{3}}, \quad (19)$$

де Δh – похибка мікрометру.

Невизначеність u_h була розглянута раніше (формула (6)).

Для більш точної оцінки невизначеності, обумовленої експериментальним визначенням густини, можна провести багаторазові вимірювання об'єму та ваги і знайти СКВ отриманих результатів, які прийняти за відповідні оцінки невизначеності по типу А.

Невизначеність, обумовлена визначенням експериментального значення коефіцієнту Пуассона.

Коефіцієнт Пуассона визначається за формулою:

$$\mu = \mu_0 \cdot (1 - \theta) . \quad (20)$$

На цю невизначеність впливає невизначеності вимірювання пористості зразка u_θ та табличного значення коефіцієнту μ_{μ_0} Пуассона.

$$u_\mu = \sqrt{\left(\frac{\partial \mu}{\partial \mu_0}\right)^2 \cdot u_{\mu_0}^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial \theta}\right)^2 \cdot u_\theta^2} . \quad (21)$$

В табл. 6 наведені типи оцінювання та їхні коефіцієнти впливу невизначеності вимірювання коефіцієнту Пуассона зразка.

Таблиця 6

Невизначеності вимірювання коефіцієнта Пуассона зразка

Позначення невизначеності	Тип оцінювання невизначеності	Коефіцієнт впливу невизначеності
μ_{μ_0}	В	$\frac{\partial \mu}{\partial \mu_0} = K_{\mu_0} = 1 - \theta$
u_θ	комбінована	$\frac{\partial \mu}{\partial \theta} = K_\theta = -\mu_0$

Невизначеністю табличного значення коефіцієнту Пуассона μ_{μ_0} :

$$u_{\mu_0} = \frac{\Delta \mu}{2\sqrt{3}} , \quad (22)$$

де $\Delta \mu$ – похибка від округлення табличного значення (рівномірний закон розподілу).

Пористість матеріалу зразка визначається за формулою:

$$\theta = \frac{\rho_{\text{теор}} - \rho_{\text{експ}}}{\rho_{\text{теор}}} . \quad (23)$$

Невизначеність вимірювання пористості зразка u_θ складається з невизначеності табличного значення густини $\rho_{\text{теор}}$ та невизначеності вимірювання густини $\rho_{\text{експ}}$:

$$u_\theta = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial \rho_{\text{теор}}}\right)^2 \cdot u_{\rho_{\text{теор}}}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \rho_{\text{експ}}}\right)^2 \cdot u_{\rho_{\text{експ}}}^2} . \quad (24)$$

Невизначеністю для табличного значення густини $u_{\rho_{\text{теор}}}$:

$$u_{\rho_{\text{теор}}} = \frac{\Delta \rho}{2\sqrt{3}} , \quad (25)$$

де $\Delta \rho$ – похибка від округлення табличного значення.

Невизначеність вимірювання густини $\rho_{\text{експ}}$ розглядалась раніше (формула (15)).

У зв'язку з тим, що сумарна невизначеність результату вимірювання модуля пружності складається з великої кількості стандартних невизначеностей приймається гіпотеза про нормальний закон розподілу результатів вимірювання. Тоді для довірчої ймовірності, яка дорівнює 0,95, значення коефіцієнту розширення становить 1,96.

За розробленою методикою були оцінені невизначеності вимірювання модулів пружності зразків, виготовлених з порошків титану з різним вмістом гідриду титану (Ti – чистий титан, TiH – чистий гідрид титану):

Ti – 10% TiH – титан з 10-ма відсотками гідриду титану,

Ti – 60% TiH – титан з 60-ма відсотками гідриду титану.

Зразки були спресовані під різним тиском (4, 6 та 8 тон).

Отримані невизначеності результатів вимірювання приведені в табл. 7 – 13.

Таблиця 7

Невизначеності результатів вимірювання об'єму

Композит	$u_v, 10^{-9} \text{ м}^3$		
	4Т	6Т	8Т
Ti	1.7	1.7	1.7
TiH	1.2	1.2	1.2
Ti-10TiH	1.8	1.7	1.7
Ti-60TiH	1.4	1.3	1.3

Таблиця 8

Невизначеності вимірювання густини

Композит	$\rho_{\text{експ}}, \text{ кг/м}^3$		
	4Т	6Т	8Т
Ti	16.0	17.8	18.7
TiH	28.8	33.5	37.2
Ti-10TiH	16.2	17.5	18.5
Ti-60TiH	14.7	15.7	16.4

Таблиця 9

Невизначеності результатів вимірювання коефіцієнту Пуассона

Композит	$u_\mu, 10^{-3}$		
	4Т	6Т	8Т
Ti	2.6	2.8	2.9
TiH	3.0	3.4	3.7
Ti-10TiH	2.6	2.8	2.9
Ti-60TiH	2.5	2.7	2.8

Таблиця 10

Невизначеності результатів
вимірювання пористості

Композит	$\alpha_0, 10^{-3}$		
	4Г	6Г	8Г
Ti	3.7	4.1	4.3
TiH	6.4	7.4	8.2
Ti-10TiH	3.6	3.9	4.1
Ti-60TiH	3.3	3.5	3.7

Таблиця 11

Невизначеності вимірювання часу
поширення пружної хвилі у зразку

Композит	$u, \text{мкс}$		
	4Г	6Г	8Г
Ti	0.2	0.2	0.4
TiH	0.2	0.2	0.4
Ti-10TiH	0.2	0.2	0.4
Ti-60TiH	0.2	0.2	0.4

Таблиця 12

Невизначеності вимірювання швидкості
проходження пружної хвилі зразків

Композит	$u_c, \text{м/с}$		
	4Г	6Г	8Г
Ti	42	64	143
TiH	40	75	190
Ti-10TiH	14	28	115
Ti-60TiH	31	40	130

Таблиця 13

Невизначеності вимірювання
модулю пружності

Композит	$\alpha_E, \text{МПа}$		
	4Г	6Г	8Г
Ti	38.3	72.9	207.8
TiH	31.5	73.8	270.9
Ti-10TiH	7.6	18.5	114.8
Ti-60TiH	13.5	23.4	155.1

Висновки

Розроблена та експериментально досліджена методика оцінки невизначеності вимірювання модулів пружності зразків композиційних матеріалів імпульсним акустичним методом.

Список літератури

1. Безьянний Ю.Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств порошковых материалов / Ю.Г. Безьянний // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5-6. – С. 23-33.
2. Труэлл Р. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. – М.: Мир, 1972. – 238 с.
3. Дорожовець М. Похибки та непевність результату вимірювання – подібність та відмінність / М. Дорожовець // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1996. – Вип. 52. – С. 113-121.
4. Захаров И.П. Теоретическая метрология / И.П. Захаров. – Х.: ХТУРЕ, 200. – 172 с.

Надійшла до редколегії 11.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.П. Мачехин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АКУСТИЧЕСКИМ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Е.Ю. Безьянная, В.С. Еременко

В статье рассмотрена процедура оценивания результата измерения модуля упругости композиционных материалов. Приведено бюджет неопределенности, формулы для расчета коэффициентов влияния составляющих суммарной неопределенности и влияющих факторов. Приведены результаты измерения и оценки неопределенности модуля упругости образцов из гидрида титана.

Ключевые слова: неопределенность, модуль упругости, акустический импульсный метод.

ESTIMATION OF THE RESULTS UNCERTAINTY OF COMPOSITE MATERIALS ELASTIC MODULUS MEASUREMENTS MADE BY PULSE ACOUSTIC METHOD

E.U. Bezymnyannaya, V.S. Eremenko

Article describes estimation procedure of composite materials elastic modulus measurement results. Uncertainty budget and equation for influence coefficients of resulting uncertainty and influence factors have given. Measurement results and uncertainty estimation of elastic modulus of titanium samples made of hydrate have presented.

Keywords: uncertainty, elastic modulus, acoustic and pulse method.