

ОЦІНКА СКЛАДОВИХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ МІКРОТВЕРДОСТІ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ

*Катерина Чорноіваненко, к.т.н., доцент., Євген Повзло,
Український державний університет науки і технологій, Україна;
e-mail: ekatmovchan@gmail.com*

Анотація

В роботі обґрунтовано необхідність оцінювання невизначеності вимірювання при контролі якості продукції. Оцінка невизначеності при визначенні точності вимірювань, дозволяє доказово вирішити питання про відповідність вимірної характеристики якості встановленим нормам. Процес оцінювання невизначеності при контролі якості продукції є достатньо трудомісткою роботою, яка передбачає ідентифікацію джерел невизначеності, виявлення кореляцій між вхідними величинами, визначення законів розподілення впливаючих величин, розрахунок коефіцієнтів чутливості, стандартної, сумарної та розширеної невизначеності. У роботі розглянуто методологію визначення складових невизначеності при вимірюванні мікротвердості структурних складових композитного матеріалу. Використовуючи діаграму Ісікава, було виявлено основні джерела невизначеності, серед яких неточність зусилля навантаження, помилки оптичної системи, похибки вимірювання діагоналей відбитка та відліку часу. В роботі подано аналіз впливових факторів та наведені математичні моделі для оцінки стандартної та розширеної невизначеності. Запропонована методика має практичну цінність для випробувальних і наукових лабораторій, які здійснюють випробування механічних властивостей матеріалів. Оцінка невизначеності вимірювань дозволяє: забезпечити відповідність встановленим стандартам, контролювати та покращувати точність і надійність процесу вимірювання.

Ключові слова

Невизначеність вимірювання, мікротвердість, оцінка невизначеності, джерела похибки, точність, композитний матеріал

1. Вступ

Розрахунок невизначеності є важливим у багатьох галузях, де проводяться вимірювання та аналіз даних. Невизначеність показує діапазон значень, у якому, ймовірно, знаходиться істинне значення вимірюваної величини, що дозволяє оцінити надійність та достовірність отриманих результатів [1...4]. Розрахунок невизначеності дозволяє виявити джерела помилок і оптимізувати процеси вимірювань, а також допомагає оцінити ризики, пов'язані з використанням результатів вимірювань.

Представлення результатів вимірювань, контролю та випробувань у формі невизначеності вимірювань стало стандартом на міжнародному рівні [5...7]. Міжнародний стандарт, такий як ISO/IEC 17025 [8], вимагає від лабораторій при проведенні калібрувань, випробувань та сертифікацій оцінювати саме невизначеність вимірювань. Це необхідно для акредитації та забезпечення міжнародного визнання результатів.

Треба також зазначити, що оцінка невизначеності є важливим інструментом для забезпечення якості продукції та послуг, оскільки вона дає змогу визначити, чи відповідають результати вимірювань встановленим вимогам.

Таким чином, розрахунок невизначеності є невід'ємною частиною якісних вимірювань та аналізу даних, що забезпечує достовірність, надійність та порівнянність результатів.

2. Мета

Метою даної статті є розробка методології оцінки невизначеності вимірювання та компонентів невизначеності для розрахунку мікротвердості структурних складових композиційного матеріалу.

3. Методологія розрахунку невизначеності мікротвердості структурних складових композитного матеріалу

Мета: визначення мікротвердості композиційного матеріалу.

Суть метода:

Алмазний індентор у формі правильної піраміди з квадратною основою та зазначеним кутом між протилежними гранями біля вершини вдавлюють у поверхню зразка, після чого вимірюють довжини діагоналей відбитку, який залишився після зняття зусилля (рисунок 1).

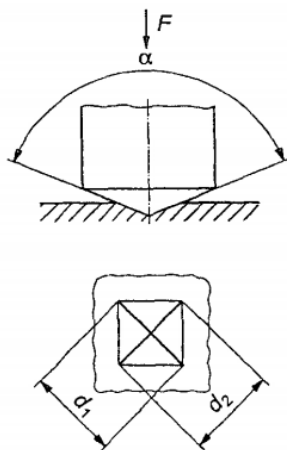


Рис. 1. Метод визначення мікротвердості: α – кут між протилежними гранями біля вершини пірамідального алмазного індентора; F – прикладене зусилля; d_1, d_2 – середнє арифметичне значення двох довжин діагоналей [9]

Мікротвердість пропорційна результату ділення числового значення величини зусилля на числове значення площі похилої поверхні відбитка, яка є правильною пірамідою з квадратною основою і має кут біля вершини, який дорівнює куту біля вершини індентора. Процедура виконання вимірювання наведена у вигляді блок-схеми (рисунок 2).

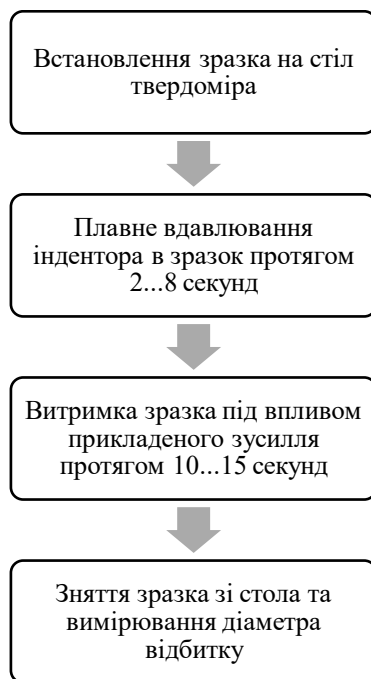


Рис. 2. Блок-схема вимірювання мікротвердості

Визначення вимірюваної величини:

Мікротвердість (МПа) обчислюють за формулою:

$$H_{\mu} = \frac{P}{F} \cdot 9,8 = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \cdot 9,8 \text{ [МПа]}, \quad (1)$$

де P – прикладене зусилля, [г];

α – кут при вершині алмазної піраміди;

F – бокова поверхня відбитку, [мкм²]:

$$F = d^2, \text{ [мкм}^2\text{]}, \quad (2)$$

де d – довжина діагоналі, [мкм]:

$$d = C \cdot N, \quad (3)$$

C – ціна поділки шкали, [мкм];

N – довжина діагоналі в поділках шкали.

Виявлення джерел невизначеності.

Метою цього етапу є виявлення основних джерел невизначеності та оцінка їхнього впливу на вимірювану величину та її неточність. Це один з найскладніших етапів у процесі оцінювання невизначеності вимірювань, оскільки існує ризик як нехтування деякими джерелами невизначеності, так і їх подвійного обліку [10].

Для виявлення основних і додаткових джерел невизначеності розглянемо вимоги до виконання вимірювання, зазначені у ДСТУ EN ISO 6507-1 [9].

Випробовування треба проводити на рівній та гладкій поверхні. Поверхня опори має бути чистою, не мати інородних речовин (окалина, мастило, бруд тощо). Чистота оброблення поверхні має забезпечувати точне визначання довжини діагоналей відбитку. Важливо, щоб зразок надійно опирався на опорну поверхню, щоб уникнути його зміщення під час випробовування.

Індентор підводять до зразка доти, поки він торкнеться його поверхні й прикладають зусилля в напрямку, перпендикулярному поверхні зразка, без удару або вібрації, поки зусилля, яке прикладають, не досягне заданого значення. Тривалість прикладання зусилля від початку до досягнення повного значення випробувального зусилля має бути не менше ніж 2 с і не більше ніж 8 с. Під час визначання твердості за малого значення зусилля і визначанні мікротвердості максимальна тривалість не має перевищувати 10 с.

Під час визначання мікротвердості індентор має входити у контакт із зразком зі швидкістю від 15 мкм/с до 70 мкм/с. Тривалість прикладання зусилля має бути від 10 с до 15 с.

Товщина випробного зразка або шару має дорівнювати, як мінімум 1,5 довжини діагоналі відбитку [9].

Як правило, випробовування проводять за кімнатної температури у межах від 10 °C до 35 °C. Випробовування, які проводять у контрольованих умовах, треба проводити за температури (23 ± 5) °C. Під час випробовування прилад має бути захищений від ударів або вібрації.

Відстань між центром відбитка та краєм зразка має бути не менше ніж 2,5 довжини діагоналі відбитка. Відстань між центрами розташованих поряд відбитків має бути не менше трьох середніх довжин діагоналей відбитків. Якщо два розташованих поряд відбитка мають різні розміри, то відстань між ними треба визначати на підставі середньої довжини діагоналей більшого відбитка.

При розраховуванні мікротвердості треба брати середнє арифметичне значення двох вимірів. Для плоских поверхонь різниця між довжинами двох діагоналей відбитка не має перевищувати 5 %. У випадку більшої різниці про це треба зазначати у протоколі випробування.

Джерела невизначеності, що притаманні процесу вимірювання мікротвердості, відображені на діаграмі Ісікави (рисунок 3).

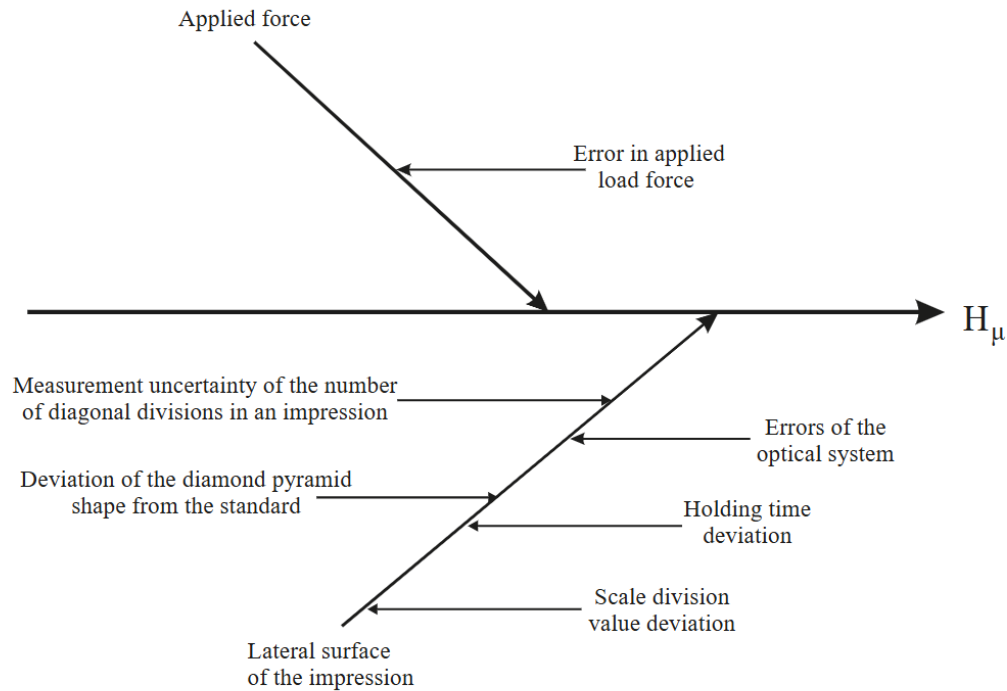


Рис. 3. Діаграми «причина – наслідок» Ісікава

Похибка навантаження твердоміра та оптичної системи мікроскопа є одними з основних джерел невизначеності вимірювання мікротвердості. Аналіз методики випробування показав, що на основні джерела невизначеності впливають другорядні чинники, які вносять значний вклад в загальну невизначеність методу.

Далі у відповідності з даними, що представлені, виконали аналіз та оцінили рівень основних джерел невизначеності.

При визначенні джерел невизначеності, у першу чергу, необхідно розглядати модель вимірювання, всі параметри, що входять у модель вимірювання, можуть бути джерелами невизначеності. Крім того, джерелами невизначеності можуть бути величини, що в явному вигляді не входять в модель вимірювання, але що впливають на результат вимірювання (наприклад, відхилення форми алмазної піраміди від норми, відхилення відліку часу навантаження тощо).

Спосіб оцінювання невизначеності для отримання значення оцінки вихідної величини Y і стандартної невизначеності $u(y)$ полягає в наступному:

- 1) визначення найкращих значень оцінок x_i вхідних величин X_i ;
- 2) визначення стандартних невизначеностей вхідних величин $u(x_i)$;
- 3) визначення коефіцієнтів чутливості c_i ;
- 4) визначення сумарної невизначеності;
- 5) визначення розширеної невизначеності.

Вклад у загальну невизначеність зусилля навантаження (Δ_F).

Для навантаження застосовують спеціальні гирі, що мають форму шайб з вирізом, вагою 5, 10, 20, 50, 100 і 200 г. Гирі поміщаються на передбачений для цієї мети майданчик у проміжку між плоскими пружинами, що підтримують шток. Допустимі відхилення у величині навантажування: для навантажень до 10 г не більше $\pm 0,1$ г, для навантажень більше 10 г не більше $\pm 1\%$.

У першому наближенні приймаємо прямокутний розподіл густини ймовірності [4] та визначаємо стандартну невизначеність за типом В [3]. У разі прямокутного (рівномірного) розподілу стандартна невизначеність визначається за формулою [7]:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

де a – напівширина довірчого інтервалу.

Вклад у загальну невизначеність вимірювання відхилення форми алмазної піраміди від норми ($\Delta_{\text{нпр}}$)

Робочі грані алмазу повинні бути ретельно відполіровані і не повинні мати тріщин та подряпин. Форма робочої частини алмазу повинна відповідати правильній чотиригранній піраміді з кутом при вершині між протилежними гранями 136° із гранично допустимим відхиленням $\pm 20'$. Ребра та вершина піраміди повинні бути без заокруглень та викрашувань.

У даному випадку стандартна невизначеність визначається на основі гіпотези про трикутний розподіл густини ймовірності [1]:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{6}}, \quad (5)$$

де a – напівширина довірчого інтервалу.

Трикутний розподіл вибрано тому, що номінальні значення відхилення від норми вірогідніші, ніж крайні значення. Тому розподіл ймовірностей краще апроксимувати трикутним розподілом, ніж прямокутним.

Вклад у загальну невизначеність вимірювання часу навантаження (Δ_t)

В методиці випробовування на твердість за Віккерсом [9] чітко прописана тривалість прикладання зусилля і витримки під час випробування, яка суттєво впливає на одержані показники мікротвердості. Тому важливо чітко дотримуватися зазначеного в методиці часу випробування. Час контролюється з точністю в межах $\pm 0,5$ секунда. Приймаючи, що розподіл у вказаних межах має трикутну форму, стандартну невизначеність розраховують з урахуванням поділу варіації часу на $\sqrt{6}$ за формулою (5) [7].

Вклад у загальну невизначеність похибки оптичної системи (Δ_{opt})

Помилки, пов'язані з недосконалістю оптичної системи мікроскопа при встановленому збільшенні об'єктиву та окуляра:

- 1) Мертвий хід гвинта окуляр-мікрометра;
- 2) Нерівномірність кроку гвинта окуляр-мікрометра;
- 3) Розбіжності осі гвинта окуляр-мікрометра та напрямку діагоналі відбитка;
- 4) Апертурна діафрагма;
- 5) Фокусування об'єктива та окуляра (паралакс);
- 6) Конденсор та польова діафрагма (напрямок та інтенсивність освітлення).

Величина помилок і розкид значень, пов'язані з недосконалістю оптичної системи мікроскопа, в основному визначатиметься досвідченістю дослідника. Теоретично обчислити величину цих помилок неможливо, тому дослідним шляхом було встановлено, що відносна помилка виміру діагоналі відбитка залежить від величини діагоналі і становить при довжині $20 \mu - 5\%$, $10 \mu - 10\%$ та $5 \mu - 20\%$. Стандартну невизначеність при цьому розраховують за формулою (4), приймаючи, що розподіл у вказаних межах має прямокутну форму [7].

Вклад у загальну невизначеність визначення кількості поділок діагоналі відбитка (Δ_N)

При наявності масиву експериментальних даних, невизначеність вимірювання, обумовлену повторними вимірюваннями кількості поділок діагоналі відбитка, визначаємо за типом А [7] за формулою [6]:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (6)$$

де X_i – i -тий результат вимірювання; $\bar{X}$ – середнє арифметичне значення результатів вимірювань; n – число спостережень.

Вклад у загальну невизначеність похибки ціни поділки шкали (Δ_C)

Невизначеність, пов'язану з похибкою ціни поділки шкали окулярним мікрометром оцінюють, використовуючи дані сертифіката про калібрування та документацію виробника. Згідно з якими, вимірювання окулярним мікрометром можна вести з точністю до $\pm 0,5$ розподілу шкали. Ціна поділки шкали в нашому випадку становила $0,25 \mu\text{м}$. При чому, стандартна невизначеність обчислюється виходячи з припущення про трикутний розподіл густини ймовірності за формулою (5), оскільки номінальні значення відхилення вірогідніші, аніж крайні значення.

Вимірювання проводили при нормальних умовах та у відсутності вібрації, тому стандартні невизначеності, що викликані цими факторами, не розраховували.

Таким чином, функція (модель) вимірювання в нашому випадку має вигляд:

$$H_\mu = f(\Delta_P, \Delta_{opt}, \Delta_{пир}, \Delta_N, \Delta_C, \Delta_\tau), \quad (7)$$

де Δ_P – похибка зусилля навантаження, [Г];

Δ_{opt} – похибка оптичної системи, [мкм];

$\Delta_{пир}$ – відхилення форми алмазної піраміди від норми, [°];

Δ_N – похибка визначення кількості поділок діагоналі відбитка;

Δ_C – похибка ціни поділки шкали, [мкм];

Δ_τ – похибка відліку часу, [с].

Кількісний вираз складових невизначеності

На даному етапі невизначеність від кожного джерела, виявленого на етапі виявлення джерел невизначеності, повинна бути виражена кількісно, а потім перерахована у стандартну невизначеність.

$$u(\Delta_P) = \frac{\Delta_P}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577 \text{ г}$$

$$u(\Delta_{\text{опт}}) = \frac{\Delta_{\text{опт}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,541}{\sqrt{3}} = 0,312 \text{ мкм}$$

$$u(\Delta_{\text{пір}}) = \frac{\Delta_{\text{пір}}}{\sqrt{6}} = \frac{20'}{\sqrt{6}} = 0,135^\circ$$

$$u(\Delta_C) = \frac{\Delta_C}{\sqrt{6}} = \frac{0,125}{\sqrt{6}} = 0,051 \text{ мкм}$$

$$u(\Delta_\tau) = \frac{\Delta_\tau}{\sqrt{6}} = \frac{0,5}{\sqrt{6}} = 0,204 \text{ с}$$

$$u_A(N) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2} = 0,3$$

Всі зазначені вище показники впливають на сумарну невизначеність вимірювання кількості поділок діагоналі відбитка, яка визначається за формулою:

$$\frac{u_c(N)}{N} = \sqrt{\left(\frac{u_A(N)}{N}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_C)}{N}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{опт}})}{N}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{пір}})}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_\tau)}{\tau}\right)^2} \quad (8)$$

Розрахунки показали, що $\frac{u_c(N)}{N}$ дорівнює 0,024.

Тоді, $u_c(N) = N \cdot 0,024 = 1,018$.

Отримані в процесі реалізації базового алгоритму проміжні результати зручно представляти у вигляді бюджету невизначеності (табл. 1), який включає список усіх вхідних величин, їх оцінок разом з приписаними ним стандартними невизначеностями вимірювання і типом розподілу.

Табл. 1. Бюджет невизначеності складових мікротвердості під час випробування

Найменування вхідної величини	Позначення	Тип оцінки невизначеності	Тип розподілу	$\frac{u(\Delta x_i)}{\Delta x_i}$	Вклад в сумарну невизначеність в %
Похибка зусилля навантаження	Δ_P	В	прямокутний	0,0058	9,8
Похибка оптичної системи	$\Delta_{\text{опт}}$	В	прямокутний	0,0072	12,2
Відхилення форми алмазної піраміди від норми	$\Delta_{\text{пір}}$	В	трикутний	0,001	1,7
Похибка визначення кількості поділок діагоналі відбитка	Δ_N	А	нормальний	0,0235	39,7
Похибка ціни поділки шкали	Δ_C	В	трикутний	0,0012	2
Похибка відліку часу	Δ_τ	В	трикутний	0,0204	34,6

Крім інформації про вхідні величини до бюджету зручно включати інформацію про величину, що вимірюється: результат вимірювання, сумарну стандартну невизначеність, ефективне число ступенів свободи, коефіцієнт охоплення і розширену невизначеність.

Розрахунок сумарної стандартної невизначеності

Мікротвердість композиційного матеріалу визначають за формулою:

$$H_\mu = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{(C \cdot N)^2} \cdot 9,8 \text{ [МПа]} \quad (9)$$

Значення вхідних величин, їх стандартні невизначеності та відносні стандартні невизначеності наведені в таблиці 2.

Табл. 2. Вхідні величини та їх невизначеності

Величина	Значення x	$u(x_i)$	$u(x_i)/x_i$
Зусилля навантаження	100 г	0,577 г	0,006
Кут при вершині алмазної піраміди	136°	0,135°	0,001
Ціна поділки шкали	0,25 мкм	0,051 мкм	0,001
Кількість поділок діагоналі відбитка	43,3	1,018	0,024

Використовуючи ці значення, знаходимо значення мікротвердості композиційного матеріалу: $H_\mu = 15505,29$ МПа.

Для визначення сумарної невизначеності виявляють кореляційний зв'язок між вхідними величинами. У нашому випадку існує кореляційний зв'язок між прикладеним зусиллям навантаження (P) і кількістю поділок діагоналі відбитка (N).

Враховуючи, що дві з вхідних величин корельовані між собою, сумарна стандартна невизначеність визначається за виразом [7]:

$$u_c^2(H_\mu) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_P c_N u(P) u(N) r(P, N), \quad (10)$$

де $u(x_i)$ – стандартна невизначеність від i -ої вхідної величини; $r(P, N)$ – ступінь кореляції між P та N ; c_P та c_N – коефіцієнти чутливості; n – кількість вхідних величин.

Коефіцієнти чутливості, що визначаються як $c_i = \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}$, показують, як змінюється вихідна оцінка φ зі зміною вхідних оцінок $x_1, \dots, x_n$ і дорівнюють [4]:

$$c_P = \frac{\partial \left(\frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{(C \cdot N)^2} \cdot 9,8 \right)}{\partial P} = \frac{2 \cdot 9,8 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{C^2 \cdot N^2}, \quad (11)$$

$$c_N = \frac{\partial \left(\frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{(C \cdot N)^2} \cdot 9,8 \right)}{\partial N} = \frac{-2 \cdot 9,8 \cdot 2 \cdot P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{C^2 \cdot N^3}, \quad (12)$$

У нашому випадку коефіцієнти чутливості склали: $c_P = 155,053$ та $c_N = -716,18$.

Ступінь кореляції між x_P та x_N характеризується оцінкою коефіцієнта кореляції, що визначається виходячи з формули:

$$r(P, N) = \frac{u(P, N)}{u(P) u(N)}. \quad (13)$$

Оцінку коваріації двох корельованих вхідних величин P та N з оцінками $\bar{P}$ та $\bar{N}$, отриманих при повторних спостереженнях, розраховують за формулою [1]:

$$u(P, N) = s(\bar{P}, \bar{N}), \quad (14)$$

де $s(\bar{P}, \bar{N})$ знаходять за виразом:

$$s(\bar{P}, \bar{N}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(N_i - \bar{N}), \quad (15)$$

де P_i та N_i – результати вимірювань величин P і N відповідно, а $\bar{P}, \bar{N}$ – їх середні значення.

У нашому випадку, при обчисленні $s(\bar{P}, \bar{N})$ за різницею $(P_i - \bar{P})$ приймаємо абсолютну похибку зусилля навантаження, в нашому випадку абсолютна похибка навантажування складає 1 г.

Таким чином, $u(P, N) = s(\bar{P}, \bar{N}) = 3,158 \cdot 10^{-16}$.

$$r(P, N) = \frac{u(P, N)}{u(P) u(N)} = \frac{3,158 \cdot 10^{-16}}{0,577 \cdot 1,018} = 5,37 \cdot 10^{-16}.$$

Отже, сумарна стандартна невизначеність при визначенні мікротвердості композитного матеріалу становить:

$$\begin{aligned} u_c^2(H_\mu) &= c_P^2 u^2(P) + c_N^2 u^2(N) + 2 c_P c_N u(P) u(N) r(P, N) \\ &= 155,05^2 \cdot 0,57^2 + (-716,18)^2 \cdot 1,018^2 + 2 \cdot 155,05 \cdot (-716,18) \cdot 0,57 \cdot 1,018 \cdot 5,37 \cdot 10^{-16} \\ &= 515524 \end{aligned}$$

$$u_c(H_\mu) = \sqrt{515524} = 718 \text{ МПа}$$

Для знаходження сумарної стандартної невизначеності $u_c(H_\mu)$ також можливо використовувати електронні таблиці Excel, оскільки вони застосовні для виразів будь-якої складності. Заповнена електронна таблиця показана на рисунку 4. Значення параметрів вписують у другий рядок від C2 до D2. Їхні стандартні невизначеності - у рядок нижче (C3-D3). Значення з (C2-D2) копіюються у другий стовпець таблиці від B5 до B6. Результат (H_μ), отриманий з цих значень, наведений як B8. Комірka C5 дає значення P із C2 плюс його невизначеність із C3. Результат обчислення, що використовує значення C5-C6, наведено у комірці C8. Стовбець D заповнено аналогічним чином. Значення у рядку 9 (C9-D9) формується як різниця рядка (C8-D8) мінус значення, зазначене у B8. У рядку 10 (C10-D10) значення рядка 9 (C9-D9) зводяться в квадрат і підсумовуються, приводячи до значення, зазначеному у B10. B12 дає сумарну стандартну невизначеність, яка дорівнює кореню квадратному з B10.

	A	B	C	D
1			P	N
2			100	43,3
3			0,58	1,018
4				
5	P	100	100,58	100
6	N	43,3	43,3	44,318
7				
8	H_μ	15505,3	15595,2	14801,2
9	$u(y,xi)$		89,9307	-704,143
10	$u(y)^2, u(y,xi)^2$	503905	8087,53	495817
11				
12	$u(H_\mu)$	709,862		

Рис. 4. Розрахунок невизначеності за допомогою електронних таблиць

Треба зазначити, що результати розрахунку сумарної невизначеності $u_c(H_\mu)$, які були отримані «вручну» і методом електронних таблиць дають майже повне співпадіння. Метод електронних таблиць значно легший і швидший, однак не може використовуватись окремо від попередніх розрахунків на стадії розробки методики. В подальшому, при практичному використанні методики, електронні таблиці значно полегшають обробку результатів вимірювання та автоматизують процес розрахунку.

Вклади у сумарну невизначеність від різних факторів представлені на рисунку 5.

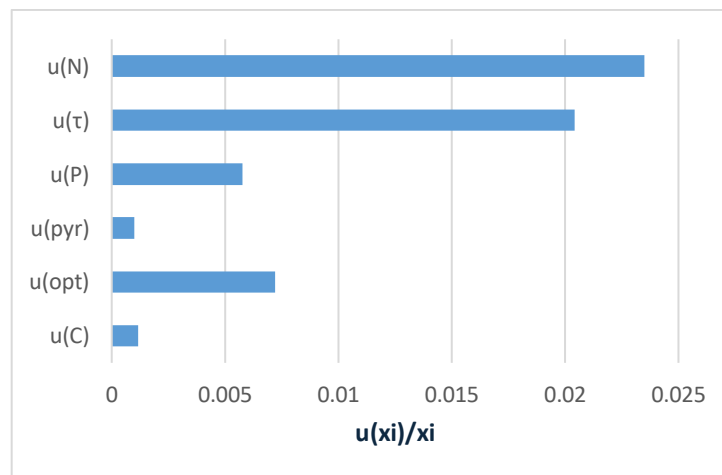


Рис. 5. Вклади складових невизначеностей вимірювання мікротвердості композитного матеріалу в сумарну невизначеність

Аналіз величини кожної складової показує, що внесок, пов'язаний з впливом похибки визначення кількості поділок діагоналі відбитка і відліку часу навантаження, є, безумовно, найбільшим і переважним. Значний вплив цих складових пов'язаний з ручним управлінням процесом вимірювання, оскільки вони безпосередньо залежать від

окремого оператора і його новиків. Використання приладів з автоматизованим процесом вимірювання дозволить значно підвищити точність вимірювання мікротвердості.

Розширену невизначеність $U(H_\mu)$ отримують множенням сумарної стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення за формулою [2]:

$$U(H_\mu) = k \cdot u_c(H_\mu), \quad (16)$$

де k – коефіцієнт охоплення.

В керівництві для вираження невизначеності вимірювання [7] рекомендується в якості коефіцієнта охоплення при довірчій ймовірності 0,95 приймати значення 2. При $k=2$, розширена невизначеність дорівнюватиме:

$$U(H_\mu) = 2 \cdot 718 = 1430 \text{ МПа}$$

Таким чином, запис результату вимірювання мікротвердості композитного матеріалу буде виглядати таким чином:
 $H_\mu = (15505 \pm 1430) \text{ МПа}$, $p=0,95$.

4. Висновки

Проведене в роботі дослідження дозволило розробити ефективну методику оцінювання складових невизначеності вимірювання мікротвердості композитного матеріалу. В роботі представлена модель вимірювання, яка включає основні джерела невизначеності. Розрахунок кожної складової було проведено з урахуванням типу розподілу та кореляційних зв'язків. На основі аналізу впливу кожної складової встановлено, що найбільший внесок у сумарну невизначеність вимірювання мікротвердості вносять неточності визначення кількості поділок діагоналі відбитка та часу навантаження, що пояснюється ручним управлінням процесом вимірювання. Застосування автоматизованих приладів суттєво підвищить точність виконання вимірювання.

Знання невизначеності вимірювання дозволяє зіставляти результати вимірювань із встановленими вимогами при оцінці відповідності, знаходити ймовірності прийняття правильних рішень та з їх урахуванням керувати виникаючими ризиками. Отримані результати сприяють підвищенню достовірності даних під час дослідження механічних властивостей матеріалів в наукових і промислових лабораторіях.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що фінансових чи інших потенційних конфліктів щодо цієї роботи немає.

Список використаної літератури

- [1] I. Farrance, R. Frenkel, "Uncertainty of Measurement: A Review of the Rules for Calculating Uncertainty Components through Functional Relationships", Clin Biochem Rev., vol. 33, 2012, p. 49-75.
- [2] G.H. White, "Basics of estimating measurement uncertainty", Clin Biochem Rev., vol. 29, 2008, p. 53–60.
- [3] A. Deacon, *Calculations in Laboratory Science*. London: ACB Venture Publications, 2009.
- [4] L. Kirkup, B. Frenkel, *An Introduction to Uncertainty in Measurement*. Cambridge University Press, 2006.
- [5] Joint Committee for Guides in Metrology Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) JCGM 100:2008. http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf
- [6] Joint Committee for Guides in Metrology Evaluation of measurement data – An introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents. JCGM 104:2009. http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_104_2009_E.pdf
- [7] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Switzerland: ISO, 1993. 101 p.
- [8] ISO/IEC 17025 - General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2017.
- [9] ДСТУ EN ISO 6507-1:2022 Металеві матеріали. Випробування на твердість за Віккерсом. Частина 1. Метод випробування, 2022.
- [10] К.О. Чорноіваненко, А.М. Должанський, "Оцінка складових невизначеності зносостійкості композитного матеріалу", Вимірювальна техніка та метрологія, vol. 86, no.1, 2025, p. 86-92. <https://doi.org/10.23939/istcmtn2025.01.086>