

ОЦІНКА СКЛАДОВИХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ

Катерина Чорноіваненко, к.т.н., доцент, Анатолій Должанський, д.т.н., проф. .
Український державний університет науки і технологій, Україна
e-mail: ekatmovchan@gmail.com

<https://doi.org/10.23939/istcmmtm2025.01.086>

Анотація

Точна оцінка похибки вимірювання має вирішальне значення для отримання надійних і значущих результатів при випробуванні стійкості матеріалу до абразивного зношування. Загалом, процес оцінювання невизначеності включає кілька етапів, включаючи ідентифікацію джерел невизначеності, визначення кореляцій між вхідними величинами та обчислення різних типів невизначеностей. Оцінка невизначеності вимірювань дозволяє: забезпечити відповідність встановленим стандартам, контролювати та покращувати точність і надійність процесу випробування. У роботі детально досліджено складові невизначеності вимірювання абразивної зносостійкості. Виявлено, що непрямі чинники можуть мати переважний вплив на сумарну невизначеність методу. Методологія оцінки невизначеності повинна бути описана в нормативних документах для забезпечення узгодженості між різними випробувальними лабораторіями. Включаючи оцінку невизначеності у випробування стійкості до абразивного зношування, дослідники та інженери можуть підвищити якість і надійність своїх результатів, сприяючи кращому прийняттю рішень при виборі матеріалів і оптимізації процесу.

Ключові слова

Похибка вимірювання, стійкість до абразивного зносу, оцінка похибки, джерела похибки, точність, композитний матеріал

1. Вступ

Розрахунок точності необхідний при проектуванні технічних систем і розрахунку їх параметрів, визначенні характеристик приладів і інструментів, які використовуються у виробництві та при опрацюванні вимірювань [1...4]. Виразення результатів вимірювань, контролю та результатів випробувань у вигляді невизначеності вимірювань стало нормою на міжнародному рівні [5...7]. Водночас методи оцінки невизначеності вимірювань прописані не у всіх нормативних документах щодо методів контролю та випробувань у багатьох галузях промисловості, в тому числі й у машинобудуванні України.

Оцінка невизначеності вимірювань є досить трудомістким процесом. Це вимагає вивчення та ідентифікації всіх джерел невизначеності, формулювання рівняння вимірювання, виявлення кореляції між вхідними величинами, ідентифікації законів розподілу вхідних величин, розрахунку стандартної, загальної та розширеної невизначеності [8, 9]. Це важко на практиці. Тому актуальною є розробка методів оцінки невизначеності вимірювань для конкретних методів контролю. Крім того, ідентифікація та порівняння компонентів невизначеності для конкретних матеріалів та умов їх експлуатації може надати інформацію для вдосконалення як методів лабораторних досліджень, так і технологій застосування.

2. Мета

Метою даної статті є розробка методології оцінки невизначеності вимірювання та компонентів невизначеності для випробувань на абразивне зношування композиційного матеріалу.

3. Методологія розрахунку невизначеності при випробуванні композитного матеріалу на абразивну зносостійкість

Мета: визначення абразивної зносостійкості композиційного матеріалу.

Визначення вимірюваної величини:

Абразивну зношеність (мг/мм^2) обчислюють за формулою:

$$I_{\text{абр}} = \frac{\Delta m}{S} [\text{мг} \cdot \text{мм}^{-2}], \quad (1)$$

де $\Delta m = m_1 - m_2$ – різниця в масі зразка до m_1 і після m_2 випробування, [мг];

S – площа робочого перерізу зразка, [мм²];

$$S = \pi(d/2)^2, [\text{мм}^2],$$

(2)

де d – діаметр циліндричного зразка, [мм].

Обладнання для випробування:

а) Верстат для приготування металографічних зразків (машина тертя):

встановлене зусилля притиску – 20 Н;

швидкість обертання – 2,5 об/с;

сумарна вібрація – 2,5 м/с².

б) Штангенциркуль цифровий від 0 до 250 мм (гранично допустима абсолютна похибка - $\pm 0,02$ мм).

в) аналітичні ваги (найбільша межа зважування – 200 г, дискретність – 0,1 мг, допустима похибка зважування — до 25 г - $\pm 0,25$ мг; від 25 до 100 г - $\pm 0,5$ мг; від 100 до 200 г - $\pm 0,75$ мг).

г) таймер-секундомір (похибка ± 1 с);

д) шліфувальний папір марки Р360 з середнім розміром зерна 40,5 мкм, допустиме відхилення $\pm 1,5$ мкм (значення визначено згідно вимог ISO 6344 [10]).

5. Результати вимірювання абразивної зносостійкості робочого шару композитного матеріалу наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати випробування зразків на абразивне зношування

m_1 , мг	m_2 , мг	d, мм
1622,9	1597,3	10,01
1622,8	1597,5	10
1623	1597,3	9,99
1623,1	1597,1	9,99
1622,9	1597,2	10,01
1623,1	1597,4	10,01
1622,7	1597,4	9,99
1622,9	1597,3	10
1622,8	1597,1	10
1623	1597,2	10,01
$\overline{m}_1 = 1622,92$	$\overline{m}_2 = 1597,28$	$\overline{d} = 10,001$

Виявлення джерел невизначеності.

Мета цього етапу полягає у виявленні основних джерел невизначеності та осмисленні їхнього впливу на вимірювану величину та її невизначеність. Це один із найважливіших етапів у оцінюванні невизначеності вимірювання, оскільки, з одного боку, є ризик нехтування якимись джерелами невизначеності, з другого - ризик їх подвійного обліку.

Використання діаграми «причина – наслідок» є одним із можливих шляхів запобігання цьому. Перший етап складання такої діаграми полягає у вказівці основних параметрів у рівнянні вимірюваної величини – основних гілок діаграми. Далі розглядають кожен етап методики і додають на діаграму наступні впливові величини як чинники, що діють за межами основних ефектів. Це роблять для кожної основної гілки доти, доки результуючі додаткові ефекти не стануть досить малими, іншими словами, поки їх вплив на результат не буде зневажливо малим.

Відповідні джерела невизначеності показані на діаграмі Ісікава (рисунок 1).

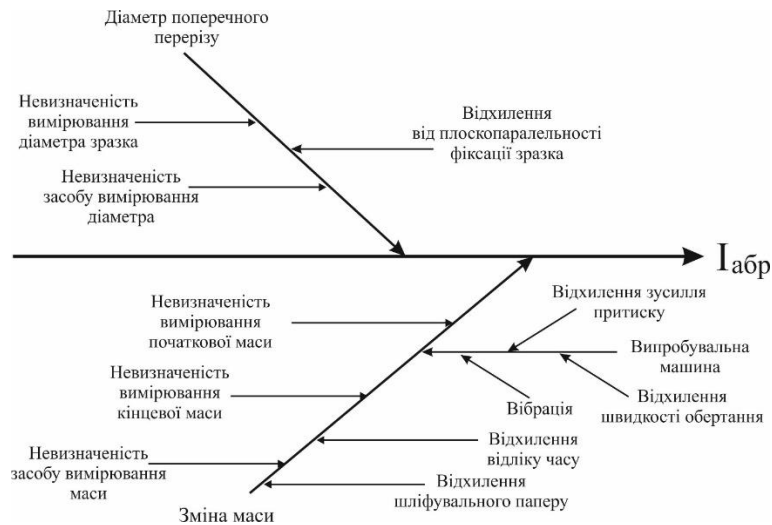


Рис. 1. Діаграми «причина – наслідок» Ісікава, що відображає вплив джерел невизначеності на вимірювання абразивного зношування.

Як було сказано вище, джерелами невизначеності можуть бути параметри, що входять до рівнянь вимірювання. В даному випадку це: різниця в масі і поперечний переріз зразків. Для виявлення додаткових джерел невизначеності розглядався процес вимірювання та метрологічні характеристики використовуваного обладнання. Основними вимогами до виконання вимірювання є умови проведення вимірювання: температура $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, відносна вологість не менше 55 % та відсутність вібрації. На перший погляд здається, що похибка лабораторних ваг для визначення маси та штангенциркуля для визначення поперечного перерізу є одними з основних джерел невизначеності. Проте, 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.

Вклад у загальну невизначеність випробувальної машини ($\Delta_{\text{прит}}$, $\Delta_{\text{оберт}}$, $\Delta_{\text{вібр}}$).

Межа припустимої відносної похибки зусилля притиску вказана в паспорті машини для приготування металографічних зразків і становить $\pm 1,0\%$ від прикладеного навантаження. Так само документація встановлює гранично допустиму відносну похибку $\pm 1,0\%$ від швидкості обертання планетарного механізму. Більше немає ніякої додаткової інформації.

Тому 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]:

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

де a – напівширина довірчого інтервалу.

Однак, логічно припустити, що в процесі випробування на абразивну зношеність у випробувальній машині з'являються вібрації, наявністю яких не можна нехтувати. Аналіз додаткових джерел інформації [11] показав, що сумарна вібрація подібних машин для шліфування складає $2,5 \text{ м/с}^2$. Користуючись діючим національним стандартом України ДСТУ EN 12096 Вібрація механічна. Повідомлення та перевірка параметрів вібрації [12], встановили, що похибка вимірювання значення вібрації становить 0,2 від загальної вібрації, що у нашому випадку складає $\pm 0,5 \text{ м/с}^2$.

Вклад у загальну невизначеність вимірювання маси (m_1 , m_2 , $\Delta_{\text{ваг}}$)

Маса зразка визначається зважуванням на аналітичних лабораторних вагах. Невизначеність, пов'язану з масою зразка також оцінюють, використовуючи дані сертифіката про калібрування ваг та документацію виробника.

У випадку, коли маємо масив експериментальних даних, стандартну невизначеність розраховуємо за типом А [7], тобто стандартна невизначеність вимірювання маси зразків визначається за формулою [4]:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (4)$$

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

Детальні обчислення складових невизначеності маси можуть бути дуже складні, і тому доцільно звертатися до рекомендацій виробника.

У документації виробника вказано, що невизначеність аналітичних лабораторних ваг обумовлена невизначеністю калібрування шкали. Це викликано змінами чутливості ваг та нелінійністю калібрувальної функції. Змінами чутливості можна знехтувати через те, що різницю мас отримують на одних і тих же вагах в дуже вузькому діапазоні вимірів.

Документація на аналітичні лабораторні ваги визначає для зважувань до 25 г похибку вимірювань $\pm 0,25$ мг. Це є максимальна різниця між дійсною масою на чашці ваг і відліком за шкалою. Виробник ваг рекомендує використовувати прямокутний розподіл для перерахунку вкладу нелінійності у стандартну невизначеність.

Тут не враховується поправка на виштовхуючу силу повітря, оскільки за згодою всі результати наводяться для зважування на повітрі [13]. Невизначеності, що залишаються, занадто малі, щоб їх облік було виправдано.

Вклад у загальну невизначеність вимірювання площі поперечного перерізу (d , $\Delta_{\text{штан}}$, $\Delta_{\text{плоск}}$)

Площа поперечного перерізу зразків S була обчислена за формулою (2), виходячи з його діаметра, який вимірювали, використовуючи цифровий штангенциркуль.

Невизначеність вимірювання, обумовлену повторними вимірюваннями діаметра зразка, визначаємо за типом А за формулою (4) [4].

Значення стандартного відхилення невизначеності виміру, обумовленої похибкою вимірювання штангенциркулем діаметра зразків можна взяти з протоколу перевірки. Необхідно мати на увазі, що в методиках перевірки штангенциркулів відсутні методики оцінювання невизначеності вимірювання при його повірці/калібруванні. На практиці у свідоцтві про перевірку/калібрування вказується лише визнання придатності даного штангенциркуля до застосування. У цьому випадку, якщо штангенциркуль визнаний придатним до застосування, вважаючи, що всі його метрологічні характеристики перебувають у допустимих межах, обумовлену похибкою штангенциркуля, невизначеність вимірювання можна визначити за виразом (3), припускаючи, що вона може бути описана прямокутним розподілом.

Оскільки зразки при випробуванні закріплюються в спеціальних струбцинах, важливо забезпечити строго паралельне розташування поверхні зразка до поверхні шліфувального паперу. Із зазначеного слідує, що виникає деяка невизначеність, пов'язана з відхиленням від плоскопаралельності поверхні. У даному випадку прийняли, що це може дати додатковий внесок у невизначеність у розмірі 2% від визначеної площі поперечного перерізу при 95% довірчій ймовірності. У цьому випадку стандартна невизначеність обчислюється виходячи з припущення про трикутний розподіл густини ймовірності [9]:

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

де a – напівширина довірчого інтервалу.

Трикутний розподіл вибрано тому, що в реальному процесі закріплення зразків в спеціальних струбцинах номінальні значення відхилення від плоскопаралельності вірогідніші, ніж крайні значення. Виходить у результаті розподіл ймовірностей краще апроксимувати трикутним розподілом, ніж прямокутним.

Вклад у загальну невизначеність вимірювання часу (Δ_t)

В методиці випробування на абразивну зношеність, що розглядається, фіксація точного часу випробування суттєво впливає на одержані показники втрати маси в процесі обробки. Тому важливо чітко дотримуватися зазначеного в методиці часу випробування.

Запропонована методика встановлює тривалість випробування 90 секунд. Час контролюється з точністю в межах ± 1 секунда. Приймаючи, що розподіл у вказаних межах має прямокутну форму, стандартну невизначеність розраховують з урахуванням поділу варіації часу на $\sqrt{3}$ за формулою (3) [7].

Вклад у загальну невизначеність зерна шліфувального паперу ($\Delta_{\text{шліф}}$)

Аналізуючи методику випробування на абразивну зношеність, яка побудована на принципі стирання контактуючих поверхонь, визначили, що розмір зерна шліфувального паперу також необхідно взяти до уваги при врахуванні джерел невизначеності. Користуючись положеннями міжнародного стандарту ISO 6344-1:1998 Coated abrasives — Grain size analysis — Part 1: Grain size distribution test [10] виявили, що для шліфувального паперу марки P360 з середнім розміром зерна 40,5 мкм допустиме відхилення $\pm 1,5$ мкм.

Якщо вимірювання проводяться в нормальних умовах та у відсутності зовнішньої вібрації, то стандартні невизначеності, що виникають від відхилення температури від номінальної та наявності вібрації не розраховуються. У разі відхилення умов проведення вимірювань від номінальних необхідно провести дослідження залежності зміни стандартних невизначеностей від зміни температури та від вібрації.

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

$$I_{\text{абр}} = f(m_1, m_2, d, \Delta_{\text{прит}}, \Delta_{\text{оберт}}, \Delta_{\text{вібр}}, \Delta_{\text{ваг}}, \Delta_{\text{штан}}, \Delta_{\text{плоск}}, \Delta_t, \Delta_{\text{шліф}}), \quad (6)$$

де m_1 – вихідна маса зразка до випробування, [мг];

m_2 – маса зразка після випробування на знос, [мг];

d – діаметр циліндричного зразка, [мм];

$\Delta_{\text{ваг}}$ – похибка аналітичних лабораторних ваг, [мг];

$\Delta_{\text{штан}}$ – похибка штангенциркуля, [мм];

$\Delta_{\text{плоск}}$ – відхилення від плоскопаралельності поверхні зразка, %;

$\Delta_{\text{прит}}$ – похибка зусилля притиску, %;

$\Delta_{\text{оберт}}$ – похибка швидкості обертання планетарного механізму випробувальної машини, %;

$\Delta_{\text{вібр}}$ – похибка вібрації випробувальної машини, [м/с²];

Δ_{τ} – похибка відліку часу, [с];

$\Delta_{\text{шліф}}$ – відхилення від середнього розміру зерна шліфувального паперу, [мкм].

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.

Випробувальна машина

$$u(\Delta_{\text{прит}}) = \frac{\Delta_{\text{прит}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,12 \text{ Н}$$

$$u(\Delta_{\text{оберт}}) = \frac{\Delta_{\text{оберт}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,025}{\sqrt{3}} = 0,014 \text{ об/с}$$

$$u(\Delta_{\text{вібр}}) = \frac{\Delta_{\text{вібр}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,29 \text{ м/с}^2$$

Маса

$$u_A(m_1) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (m_{1i} - \bar{m}_1)^2} = 0,042 \text{ мг}$$

$$u_A(m_2) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (m_{2i} - \bar{m}_2)^2} = 0,042 \text{ мг}$$

$$u(\Delta_{\text{ваг}}) = \frac{\Delta_{\text{ваг}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,25}{\sqrt{3}} = 0,14 \text{ мг}$$

Час

$$u(\Delta_{\tau}) = \frac{\Delta_{\tau}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58 \text{ с}$$

Шліфувальний папір ($\Delta_{\text{шліф}}$)

$$(\Delta_{\text{шліф}}) = \frac{\Delta_{\text{шліф}}}{\sqrt{3}} = \frac{1,5}{\sqrt{3}} = 0,87 \text{ мкм}$$

Всі зазначені вище показники впливають на сумарну невизначеність вимірювання маси, яка визначається за формулою:

$$\frac{u_c(m_1)}{m_1} = \sqrt{\left(\frac{u_A(m_1)}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{ваг}})}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{прит}})}{F_{\text{прит}}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{оберт}})}{V_{\text{оберт}}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{вібр}})}{a_{\text{вібр}}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\tau})}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{шліф}})}{\Delta_{\text{шліф}}}\right)^2}.$$

Розрахунки показали, що $\frac{u_c(m_1)}{m_1}$ дорівнює 0,12.

Тоді, $u_c(m_1) = m_1 \cdot 0,12 = 192,21 \text{ мг}$.

$$\frac{u_c(m_2)}{m_2} = \sqrt{\left(\frac{u_A(m_2)}{m_2}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{ваг}})}{m_2}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{прит}})}{F_{\text{прит}}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{оберт}})}{V_{\text{оберт}}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{вібр}})}{a_{\text{вібр}}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\tau})}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{шліф}})}{\Delta_{\text{шліф}}}\right)^2}.$$

Розрахунки показали, що $\frac{u_c(m_2)}{m_2}$ дорівнює 0,12.

Тоді, $u_c(m_2) = m_2 \cdot 0,12 = 189,17 \text{ мг}$.

Оскільки виявлені джерела невизначеності впливають саме на зміну маси зразка Δm під час випробування, то розрахуємо стандартну невизначеність Δm :

$$\frac{u_c(\Delta m)}{\Delta m} = \sqrt{\left(\frac{u_A(m)}{\Delta m}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{ваг}})}{\Delta m}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{прит}})}{F_{\text{прит}}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{оберт}})}{V_{\text{оберт}}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{вібр}})}{a_{\text{вібр}}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\tau})}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{шліф}})}{\Delta_{\text{шліф}}}\right)^2}.$$

Розрахунки показали, що $\frac{u_c(\Delta m)}{\Delta m}$ дорівнює 0,12.

Тоді, $u_c(\Delta m) = \Delta m \cdot 0,12 = 3,04 \text{ мг}$

Отримані в процесі реалізації базового алгоритму проміжні результати зручно представляти у вигляді бюджету невизначеності (табл. 2), який включає список усіх вхідних величин, їх оцінок разом з приписаними ним стандартними невизначеностями вимірювання і типом розподілу.

Таблиця 2. Бюджет невизначеності зміни маси зразка Δm 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 %
Різниця в масі зразка до m_1 і після m_2 випробування	Δm	A	нормальний	0,0024	1,5
Похибка аналітичних лабораторних ваг	$\Delta_{\text{ваг}}$	B	прямокутний	0,0055	3,3
Похибка зусилля притиску	$\Delta_{\text{прит}}$	B	прямокутний	0,006	3,7
Похибка швидкості обертання планетарного механізму випробувальної машини	$\Delta_{\text{оберт}}$	B	прямокутний	0,0056	3,4
Похибка вібрації у випробувальній машині	$\Delta_{\text{вібр}}$	B	прямокутний	0,116	71,0
Похибка відліку часу	$\Delta_{\text{т}}$	B	прямокутний	0,0064	3,9
Відхилення від середнього розміру зерна шліфувального паперу	$\Delta_{\text{шліф}}$	B	прямокутний	0,021	13,1

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.

Площа поперечного перерізу (d , $\Delta_{\text{штан}}$, $\Delta_{\text{плоск}}$)

$$u_A(d) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} = 0,0028 \text{ мм}$$

$$u(\Delta_{\text{штан}}) = \frac{\Delta_{\text{штан}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,02}{\sqrt{3}} = 0,012 \text{ мм}$$

$$u(\Delta_{\text{плоск}}) = \frac{\Delta_{\text{плоск}}}{\sqrt{6}} = \frac{S \cdot 2\%}{\sqrt{6}} = \frac{1,57}{\sqrt{6}} = 0,64 \text{ мм}^2$$

Ці три вклади підсумовують, отримуючи стандартну невизначеність $u(d)$ діаметру:

$$\frac{u(d)}{d} = \sqrt{\left(\frac{u_A(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{штан}})}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_{\text{плоск}})}{S}\right)^2}.$$

Розрахунки показали, що $\frac{u(d)}{d}$ дорівнює 0,0082.

Тоді, $u(d) = d \cdot 0,0082 = 0,082 \text{ мм}$.

Бюджет невизначеності вимірювання діаметру поперечного перерізу зразка наведено в таблиці 3.

Таблиця 3. Бюджет невизначеності діаметру поперечного перерізу зразка

Найменування вхідної величини	Позначення	Тип оцінки невизначеності	Тип розподілу	$\frac{u(x_i)}{x_i}$	Вклад в сумарну невизначеність в %
Вимірний діаметр циліндричного зразка	d	A	нормальний	0,00028	2,9
Похибка штангенциркуля	$\Delta_{\text{штан}}$	B	прямокутний	0,0012	12,5
Відхилення від плоскопаралельності	$\Delta_{\text{плоск}}$	B	трикутний	0,008	84,6

льності поверхні зразка					
-------------------------	--	--	--	--	--

Розрахунок сумарної стандартної невизначеності

Абразивну зношеність ($I_{\text{абр}}$) дослідних сплавів визначають за формулою:

$$I_{\text{абр}} = \frac{\Delta m}{S} = \frac{m_1 - m_2}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad [\text{мг} \cdot \text{мм}^{-2}]. \quad (7)$$

Значення вхідних величин, їх стандартні невизначеності та відносні стандартні невизначеності наведені в таблиці 4.

Таблиця 4. Вхідні величини та їх невизначеності

Величина	Значення x	u(x _i)	u(x _i)/x _i
Маса зразка до випробування m_1	1622,9 мг	192,21 мг	0,12
Маса зразка після випробування m_2	1597,3 мг	189,17 мг	0,12
Δm	25,64 мг	3,04 мг	0,12
Діаметр зразка, d	10,001 мм	0,082 мм	0,0082

Використовуючи ці значення, знаходимо значення абразивної зносостійкості робочого шару композитного матеріалу:

$$I_{\text{абр}} = \frac{\Delta m}{S} = \frac{m_1 - m_2}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{1622,9 - 1597,3}{\pi \cdot \left(\frac{10,001}{2}\right)^2} = 0,3266 \text{ мг} \cdot \text{мм}^{-2}$$

Для визначення сумарної невизначеності виявляють кореляційний зв'язок між вхідними величинами. У нашому випадку існує кореляційний зв'язок між діаметром поперечного перерізу зразка d і різницею в масі зразка Δm .

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

$$u_c^2(I_{\text{абр}}) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{\Delta m} c_d u(\Delta m) u(d) r(\Delta m, d), \quad (8)$$

де $u(x_i)$ – стандартна невизначеність від i-ої вхідної величини; $r(\Delta m, d)$ – ступінь кореляції між Δm та d; $c_{\Delta m}$ та c_d – 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 [14]:

$$c_{\Delta m} = \frac{\partial \left(\frac{\Delta m}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right)}{\partial \Delta m} = \frac{1}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2}, \quad (10)$$

$$c_d = \frac{\partial \left(\frac{\Delta m}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right)}{\partial d} = -\frac{8 \Delta m d^{-3}}{\pi}. \quad (11)$$

У нашому випадку коефіцієнти чутливості склали: $c_{\Delta m} = 0,013$ та $c_d = -0,065$.

Ступінь кореляції між $x_{\Delta m}$ та x_d характеризується оцінкою коефіцієнта кореляції, що визначається виходячи з формули:

$$r(x_{\Delta m}, x_d) = \frac{u(\Delta m, d)}{u(\Delta m) u(d)}. \quad (12)$$

Оцінку коваріації двох корельованих вхідних величин Δm та d з оцінками $\overline{m_1}$, $\overline{m_2}$ та $\bar{d}$, отриманих при повторних спостереженнях, розраховують за формулою [9]:

$$u(\Delta m, d) = s(\overline{m_1}, \overline{m_2}, d), \quad (13)$$

де $s(\overline{m_1}, \overline{m_2}, d)$ знаходять за виразом:

$$s(\overline{m_1}, \overline{m_2}, \bar{d}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left((m_{1i} - m_{2i}) - (\overline{m_1} - \overline{m_2}) \right) (d_i - \bar{d}), \quad (14)$$

де m_{1i} , m_{2i} та d_i – результати вимірювань величин m_1 , m_2 і d відповідно, а $\overline{m_1}$, $\overline{m_2}$, $\overline{d}$ – їх середні значення.

Таким чином, $u(x_{\Delta m}, x_d) = s(\overline{m_1}, \overline{m_2}, d) = 1,78 \cdot 10^{-5}$.

$$r(x_{\Delta m}, x_d) = \frac{u(\Delta m, d)}{u(\Delta m)u(d)} = \frac{1,78 \cdot 10^{-5}}{3,04 \cdot 0,082} = 7,1 \cdot 10^{-5}.$$

Отже, сумарна стандартна невизначеність при визначенні абразивної зносостійкості робочого шару композитного матеріалу становить:

$$\begin{aligned} u_c^2(I_{\text{абр}}) &= c_{\Delta m}^2 u^2(\Delta m) + c_d^2 u^2(d) + 2c_{\Delta m} c_d u(\Delta m)u(d)r(\Delta m, d) \\ &= 0,013^2 \cdot 3,04^2 + (-0,065)^2 \cdot 0,082^2 + 2 \cdot 0,013 \cdot (-0,065) \cdot 3,04 \cdot 0,082 \cdot 7,1 \cdot 10^{-5} = 0,0015 \\ u_c(I_{\text{абр}}) &= \sqrt{0,0015} = 0,039 \text{ мг} \cdot \text{мм}^{-2} \end{aligned}$$

Вклади у сумарну невизначеність від різних факторів представлені на рисунку 2.

Перевірка величини кожної складової показує, що внесок, пов'язаний з впливом вібрації випробувальної машини, є, безумовно, найбільшим і переважним. Тому цю складову в подальшому потрібно досліджувати детальніше і розробити шляхи для її зменшення.

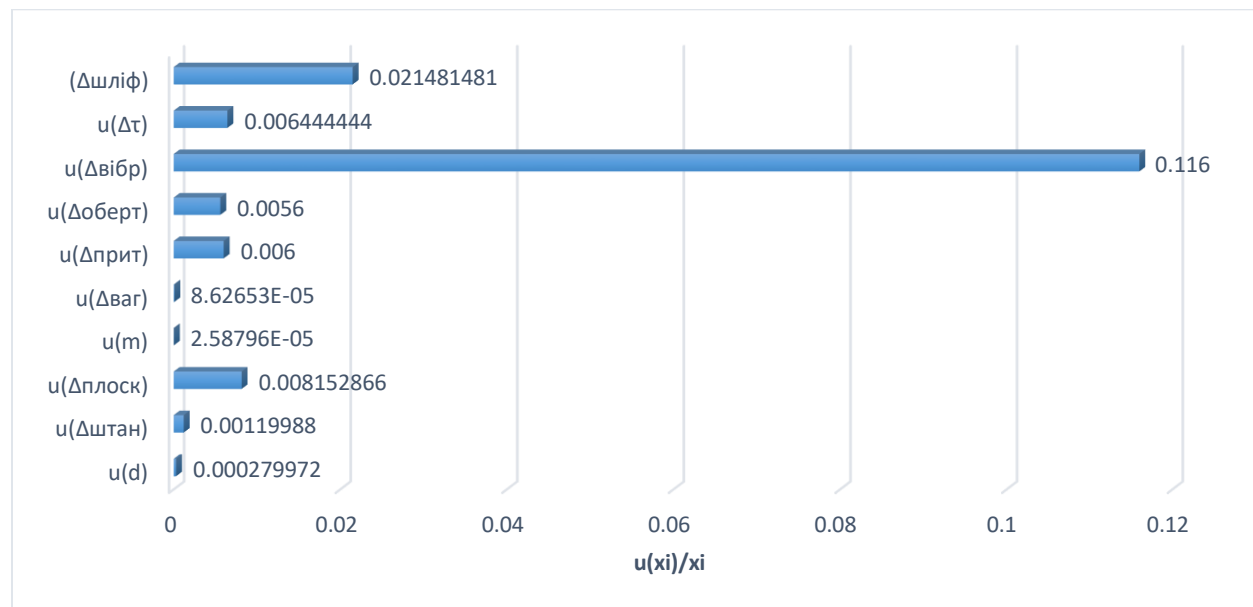


Рис. 2. Вклади складових невизначеностей вимірювання абразивної зносостійкості робочого шару композитного матеріалу в сумарну невизначеність

Розширену невизначеність $U(I_{\text{абр}})$ отримують множенням сумарної стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення за формулою [2]:

$$U(I_{\text{абр}}) = k \cdot u_c(I_{\text{абр}}), \quad (15)$$

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:

$$U(I_{\text{абр}}) = 2 \cdot 0,039 = 0,078 \text{ мг} \cdot \text{мм}^{-2}$$

Таким чином, запис результату вимірювання абразивної зносостійкості робочого шару композитного матеріалу для швидкорізальних сталей буде виглядати таким чином:

$$I_{\text{абр}} = (0,327 \pm 0,078) \text{ мг} \cdot \text{мм}^{-2}, p=0,95.$$

4. Висновки

Розроблено методику оцінки невизначеності вимірювання абразивного зношування. Згідно з міжнародними нормативними документами, оцінка невизначеності вимірювань повинна передбачати виявлення джерел невизначеності, наявності кореляції між вхідними величинами, визначення законів розподілу вхідних величин, коефіцієнтів чутливості, стандартної, загальної та розширеної невизначеностей. Знання невизначеності вимірювань дозволяє порівнювати результати вимірювань із встановленими вимогами під час оцінки відповідності. Це також дає можливість контролювати вимірювальні та технологічні процеси. У процесі дослідження зношування

композиційних матеріалів на машині тертя за розробленою методикою оцінки невизначеності встановлено, що основний внесок у сумарну невизначеність вносять вібраційні впливи. Для підвищення достовірності результатів таких вимірювань ставиться завдання зниження вібрації обладнання. Представлений підхід може бути використаний в наукових і промислових лабораторіях для підвищення надійності інших видів вимірювань.

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. Switerland: ISO, 1993. 101 p.
- [8] N. F. Zhang, "Calculation of the uncertainty of the mean of autocorrelated measurements", Metrologia, vol. 43, 2006, 76–81.
- [9] J. R. Taylor, "An Introduction to Error Analysis, the study of uncertainties in physical measurements". California: University Science Books, 1997.
- [10] ISO 6344-1:1998 Coated abrasives. Grain size analysis. Part 1: Grain size distribution test. Switzerland: ISO, 1998.
- [11] Available: <https://uk.qiantongutmtester.com/>
- [12] CEN EN 12096-1997 Mechanical vibration - Declaration and verification of vibration emission values, 1997.
- [13] OIML D 28:2004 Conventional value of the result of weighing in air, 2004.