

## ОЦІНКА ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ ПОКРИТТІВ

### ESTIMATION OF MEASUREMENT ERROR OF THE PAVEMENTS ELASTICITY MODULUS



**Мельниченко Олександр Іванович**, кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства, e-mail: [melnichenko@ntu.edu.ua](mailto:melnichenko@ntu.edu.ua), +38 (044) 280-98-05

<http://orcid.org/0000-0003-0791-6532>



**Долгов Микола Анатолійович**, доктор технічних наук, доцент Національний транспортний університет, професор кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства, e-mail: [m.dolgov@ntu.edu.ua](mailto:m.dolgov@ntu.edu.ua), +38 (044) 280-98-05

<http://orcid.org/0000-0002-3962-7551>

**Анотація.** Розглянуто різні методи вимірювання модуля пружності покриттів. Наведено фактори, що впливають на похибку вимірювання характеристик пружності покриттів. Проведено аналіз метрологічного забезпечення методики визначення модуля пружності покриттів під час випробування зразків на розтяг. Розрахована абсолютна та відносна похибки вимірювання модуля пружності покриття.

**Ключові слова:** покриття, точність вимірювання, товщина покриття, модуль Юнга, випробування на розтяг.

**Вступ.** Покриття широко використовуються в різних сферах машинобудування. Вони захищають деталі та механізми машин від впливу температур, корозії радіації, зносу тощо.

Модуль пружності є однією з найбільш важливих механічних характеристик матеріалу. Особливістю матеріалів у вигляді покриття є те, що їх модуль пружності відрізняється від модуля пружності того ж матеріалу, але в компактному вигляді. Тому його треба визначати для кожного конкретного покриття. Модуль пружності покриттів є технологічно залежною характеристикою, тому що залежить від умов нанесення та мікроструктури матеріалу.

Складність експериментальних методик для визначення модуля пружності покриття викликає появу похибок. Тому вдосконалення метрологічного забезпечення методів визначення модулів пружності та оцінка похибки вимірювання пружних характеристик є актуальною науково-практичною задачею. А розробка нових методів визначення модуля пружності покриттів повинна охоплювати наукову та технічну складові метрологічного забезпечення.

**Мета і методи.** Метрологічне забезпечення методів визначення модуля пружності покриттів базується на встановленні технічних засобів, необхідних для досягнення єдності та точності вимірювань. Для дослідження характеристик пружності покриттів використовують статичні та динамічні методи [1]. Статичні методи вимірюють модулі пружності покриттів(зразків), відділених від

основи. Також для цих методів використовують зразки у вигляді системи основа-покриття. В таких зразках під час випробувань виникають навантаження як в основі та покритті.

Для визначення модуля пружності покриття використовують різні види навантаження: трьох точкове згинання зразка з покриттям [2]; чотирьох точкове згинання зразка з покриттям [3]; згинання консольної балки, на яку з двох боків нанесене покриття [4]; згинання консольної балки з покриттям на одній стороні [5]; розтягування зразка [1], вдавнення індентора [6, 7]. Динамічним методом модуль пружності покриттів визначали в роботах [8, 9].

В процесі вимірювання модуля пружності покриття виникає ряд факторів, що впливають на похибку результатів експериментальних досліджень. Ці фактори можна розділити на дві групи:

1) пов'язані з вибором методу вимірювання, що включають в себе конструкційні особливості зразків з покриттями;

2) пов'язані з умовами проведення експерименту.

**Результати і пояснення.** Розрахунок похибки вимірювання провели на прикладі методики розробленої раніше [1]. Методика вимірювання модуля пружності покриття полягає в наступному. Плоский металевий зразок з покриттям навантажують на розривній машині. На верхню та нижню поверхню металевого зразка (основу) нанесено покриття однакової товщини. Частина основи в робочій зоні зразка залишалася непокритою. Цю зону без покриття використовують для вимірювання деформації основи на ділянці без покриття. Під час розтягу зразка спочатку контролюють деформації основи на ділянці без покриття і після досягнення нею деякого рівня  $\epsilon$  вимірюють за допомогою динамометра відповідне їй зусилля  $P_s$ . Потім контролюють деформації основи на ділянці зразка з покриттям і після досягнення нею рівня  $\epsilon$ , вимірюють відповідне зусилля  $P_{s-c}$ . Відповідно до формули (1) визначають модуль пружності покриття  $E_c$ .

$$E_c = E_s \frac{H}{h} \left( \frac{P_{s-c}}{P_s} - 1 \right), \quad (1)$$

де  $E_s$  – модуль пружності покриття,  $H$  – половина товщини металевої основи,  $h$  – товщина покриття.

Геометричні параметри типових зразків з покриттями наступні:

$$H = 1 \text{ мм}; \quad h = 0,2 \text{ мм},$$

Абсолютні похибки вимірювання товщини наступні:

$$\Delta H = 0,005 \text{ мм}; \quad \Delta h = 0,005 \text{ мм}.$$

Приймемо, що модуль пружності металевої основи становить  $E_s = 210$  ГПа.

Положимо, що вимірювання навантаження показали наступне:

$$P_{s-c} = 1100; \quad P_s = 1000.$$

Абсолютні похибки вимірювання навантаження наступні:

$$\Delta P_{s-c} = 5 \text{ Н}; \quad \Delta P_s = 5 \text{ Н}.$$

Розрахували середнє значення модуля пружності покриття  $E_c$ :

$$\begin{aligned} E_c (< P_{s-c} >, < P_s >, < H >, < h >) &= E_s \cdot \frac{< H >}{< h >} \left( \frac{< P_{s-c} >}{< P_s >} - 1 \right) = \\ &= 210 \cdot \frac{0,5}{0,2} \cdot \left( \frac{1100}{1000} - 1 \right) = 52,5 \text{ ГПа} \end{aligned}$$

Обчислили похідні функції (1):

$$\frac{\partial E_c}{\partial P_{s-c}} = \frac{E_s H}{h P_s} \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_c}{\partial P_s} = -\frac{E_s H P_{s-c}}{h P_s^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial E_c}{\partial H} = \frac{E_s}{h} \left( \frac{P_{s-c}}{P_s} - 1 \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_c}{\partial h} = -\frac{E_s H}{h^2} \left( \frac{P_{s-c}}{P_s} - 1 \right) \quad (5)$$

Обчислили значення похідних від середніх значень аргументів відповідно до формул (2) – (4):

$$\frac{\partial E_c}{\partial P_{s-c}} = \frac{210 \cdot 0,5}{0,2 \cdot 1000} = 0,53 \frac{\text{ГПа}}{\text{Н}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial E_c}{\partial P_s} = -210 \cdot \frac{1}{0,2} \cdot \frac{1100}{1000^2} = -0,58 \frac{\text{ГПа}}{\text{Н}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial E_c}{\partial H} = \frac{210}{0,2} \cdot \left( \frac{1100}{1000} - 1 \right) = 105 \frac{\text{ГПа}}{\text{мм}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial E_c}{\partial h} = -\frac{210 \cdot 1}{0,2^2} \left( \frac{1100}{1000} - 1 \right) = -262,5 \frac{\text{ГПа}}{\text{мм}} \quad (9)$$

Обчислили складові похибки функції:

$$\Delta E_1 = \left| \frac{\partial E_c}{\partial P_{s-c}} \right| \cdot \Delta P_{s-c} \approx 2,63 \text{ ГПа}$$

$$\Delta E_2 = \left| \frac{\partial E_c}{\partial P_s} \right| \cdot \Delta P_s \approx 2,89 \text{ ГПа}$$

$$\Delta E_3 = \left| \frac{\partial E_c}{\partial H} \right| \cdot \Delta H \approx 0,53 \text{ ГПа}$$

$$\Delta E_4 = \left| \frac{\partial E_c}{\partial h} \right| \cdot \Delta h \approx 1,31 \text{ ГПа}$$

Розраховували абсолютну  $\Delta E_c$  та відносну  $\delta E_c$  похибки вимірювання модуля пружності покриття:

$$\Delta E_c = \sqrt{(\Delta E_1)^2 + (\Delta E_2)^2 + (\Delta E_3)^2 + (\Delta E_4)^2} = 4,2 \text{ ГПа}$$

$$\delta E_c = \frac{\Delta E_c}{\langle E_c \rangle} = 7,9\%$$

Результат вимірювання модуля пружності  $E_c$  після округлення можна записати в наступному вигляді:

$$E_c = (53 \pm 4) \text{ ГПа}, \quad \delta E_c = 8\% \quad (10)$$

### Висновки та рекомендації

Розглянуто питання метрологічного забезпечення методів вимірювання модуля пружності покриттів. Метрологічне забезпечення полягає в застосуванні метрологічних норм, правил та методик вимірювання, а також розробці, виготовленні й застосуванні засобів вимірювальної техніки для забезпечення єдності і необхідної точності вимірювань.

Для повного метрологічного забезпечення розглянутого методу вимірювання модуля пружності покриття під час випробування зразків з покриттям необхідно розробити комплект нормативно-технічних документів за трьома складовими:

- опис методу вимірювання та його суті;
- опис засобів вимірювання навантаження, деформації та товщини покриття;
- опис засобів вимірювальної техніки, що реалізують даний метод, вимоги до них, методики градування, калібрування та повірки, а також рекомендації щодо використання.

### Перелік посилань

1. Dolgov N.A. Method for Determining the Modulus of Elasticity for Gas Thermal Spray Coatings / N.A. Dolgov // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2004. – V.43. – P. 423 – 428.
2. Yilbas B.S. HVOF coating and laser treatment: three-point bending tests / B.S. Yilbas, A. Arif, M.A. Gondal // Journal of Materials Processing Tech. – 2005. – V.164 – 165. – P.954 – 957.
3. Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings. I: Four point bend test / A.Kucuk, C.C.Berndt, U.Senturk et al. // Materials Science and Engineering: A. – 2000. – V.284. – P.29 – 40.
4. Вязовская Л.М. Определение модуля упругости тонких покрытий / Л.М. Вязовская, Г.Н. Гутман, В.Г. Фокин // Заводская лаборатория. – 1986. – Т. 52, № 10. – С. 76 – 77.
5. Khan A. Young's modulus of silicon nitride used in scanning force microscope cantilevers / A. Khan, J. Philip, P. Hess // Journal of Applied Physics. – 2004. – V. 95, No 4. – P. 1667 – 1672.
6. Relationships between hardness, Young's modulus and elastic recovery in hard nanocomposite coatings / J.Musil, F.Kunc, H.Zeman, H.Polakova // Surface and Coatings Technology. – 2002. – V. 154, Nos 2 – 3. – P. 304 – 313.
7. A new technique to determine the elastoplastic properties of thin metallic films using sharp indenters / J.L. Bucaille, S. Stauss, P. Schwaller, J. Michler // Thin Solid Films. – 2004. – V. 447. – P. 239 – 245.
8. Measurement of the elastic modulus of nanostructured gold and platinum thin films / M.C. Salvadori, I.G. Brown, A.R. Vaz et al. // Phys. Rev. B. – 2003. – V. 67, No 15. – P. 1 – 4.
9. Arai M. Estimation method of Young's modulus of thermal barrier coating layer based on free bending vibration / M. Arai, K. Kishimoto // Journal of the Society of Materials Science. – 2003. – V. 52, No 9. – P. 1135 – 1139.

### ESTIMATION OF MEASUREMENT ERROR OF THE PAVEMENTS ELASTICITY MODULUS

**Melnichenko Olexander Ivanovich**, PhD (Candidate of Technical Sci), Professor, National Transport University, Chief of Department of Manufacturing, Repair and Materials Engineering, e-mail: [melnichenko@ntu.edu.ua](mailto:melnichenko@ntu.edu.ua), +38 (044) 280-98-05, <http://orcid.org/0000-0003-0791-6532>

**Dolgov Mykola Anatolievich** D.Sc., Associate Professor, National Transport University, Professor of Department of Manufacturing, Repair and Materials Engineering, e-mail: [m.dolgov@ntu.edu.ua](mailto:m.dolgov@ntu.edu.ua), +38 (044) 280-98-05, <http://orcid.org/0000-0002-3962-7551>

**Abstract.** Various methods for measuring the modulus of elasticity of coatings are considered. The factors influencing the error of measuring the elastic characteristics of coatings are given. The analysis of metrological support of the method of determining the modulus of elasticity of coatings during tensile testing of samples is carried out. The absolute and relative measurement errors of the modulus of elasticity of the coating are calculated.

**Keywords:** coating, measurement accuracy, coating thickness, Young's modulus, tensile tests.

#### References

1. Dolgov N.A. Method for Determining the Modulus of Elasticity for Gas Thermal Spray Coatings / N.A. Dolgov // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2004. – V.43. – P. 423 – 428.
2. Yilbas B.S. HVOF coating and laser treatment: three-point bending tests / B.S. Yilbas, A. Arif, M.A. Gondal // Journal of Materials Processing Tech. – 2005. – V.164 – 165. – P.954 – 957.
3. Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings. I: Four point bend test / A.Kucuk, C.C.Berndt, U.Senturk et al. // Materials Science and Engineering: A. – 2000. – V.284. – P.29 – 40.
4. Вязовская Л.М. Определение модуля упругости тонких покрытий / Л.М. Вязовская, Г.Н. Гутман, В.Г. Фокин // Заводская лаборатория. – 1986. – Т. 52, № 10. – С. 76 – 77.
5. Khan A. Young's modulus of silicon nitride used in scanning force microscope cantilevers / A. Khan, J. Philip, P. Hess // Journal of Applied Physics. – 2004. – V. 95, No 4. – P. 1667 – 1672.
6. Relationships between hardness, Young's modulus and elastic recovery in hard nanocomposite coatings / J.Musil, F.Kunc, H.Zeman, H.Polakova // Surface and Coatings Technology. – 2002. – V. 154, Nos 2 – 3. – P. 304 – 313.
7. A new technique to determine the elastoplastic properties of thin metallic films using sharp indenters / J.L. Bucaille, S. Stauss, P. Schwaller, J. Michler // Thin Solid Films. – 2004. – V. 447. – P. 239 – 245.
8. Measurement of the elastic modulus of nanostructured gold and platinum thin films / M.C. Salvadori, I.G. Brown, A.R. Vaz et al. // Phys. Rev. B. – 2003. – V. 67, No 15. – P. 1 – 4.
9. Arai M. Estimation method of Young's modulus of thermal barrier coating layer based on free bending vibration / M. Arai, K. Kishimoto // Journal of the Society of Materials Science. – 2003. – V. 52, No 9. – P. 1135 – 1139.