

УДК 620.1

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ В УМОВАХ  
СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА**

**Кандидати техн. наук О. В. Афанасьєва, Г. Л. Комарова,  
Н. О. Лалазарова, О. Г. Попова**

**ANALYSIS OF METHODS FOR CONTROLLING SURFACE ROUGHNESS IN MODERN  
PRODUCTION CONDITIONS**

**PhD (Tech.) O. Afanasieva, PhD (Tech.) G. Komarova,  
PhD (Tech.), N. Lalazarova, PhD (Tech.) O. Popova**

**DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362302>**



***Анотація.** У роботі проведено комплексний порівняльний аналіз сучасних контактних і безконтактних методів оцінювання шорсткості поверхні, яка впливає на тертя, зносостійкість, експлуатаційні властивості деталей, якість зображення для оптичних деталей. Досліджено фізичні принципи роботи і метрологічні можливості профілометрів, інтерферометрів і лазерних сканувальних систем. На прикладі високоміцного чавуну з різною мікроструктурою і твердістю продемонстровано ефективність використання шупових методів для оперативного контролю шорсткості в умовах сучасного виробництва. Визначено раціональні галузі застосування оптичних методів для високоточних поверхонь. Показана перевага лазерних методів, що мають високу продуктивність, як для вимірювання шорсткості, так і обробки її результатів. Результати дослідження дають змогу оптимізувати вибір засобів вимірювання для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей виробів.*

***Ключові слова:** шорсткість поверхні, профілограма, високоміцний чавун, інтерференція, лазерний інтерферометр, оптичні вимірювання, відбиття, метрологічні показники, лазерний профілограф.*

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Афанасьєва О. В., Комарова Г. Л., Лалазарова Н. О., Попова О. Г., 2026.

**Abstract.** Surface roughness is one of the main geometric characteristics of the surface roughness of parts, which, in turn, affects their operational performance as a whole. The surface brushiness significantly ensures high operational power of machine parts and accessories and depends on the power of the material and processing method. Control of surface hairiness depends on a variety of contact and non-contact methods, the skin of which has its own advantages and shortcomings, hair loss.

The robot carried out a comprehensive comprehensive analysis of current methods for assessing surface shortness, explored the physical principles of the robot and the metrological capabilities of vibrating methods (profilometers, interferometers, laser scanning systems etc.).

Contact methods are recommended to be used in the minds of daily production at machine-building enterprises, if they ensure the necessary accuracy and productivity. Profilometric (contact) measurement of shortness is a method of determining the microgeometry of a surface with the help of a mechanical probe (head), which moves along the surface and fixes its unevenness. This is one of the most accurate and extensive methods that are regulated by standards. The method allows you to visualize the specific characteristics of the shortness with high accuracy, but on the surface of the part there may be no micro-fragments. This includes a variety of contact methods for polished, precision and optical parts.

Optical methods of hair loss (raster, reflexometric, light cut, shadow cut, interferometric) are non-contact methods that are based on the interaction of light and shadow to the surface. They ensure high precision control, do not spoil the details and allow mirror-like or polished surfaces, as well as leather coatings. All of these methods are characterized by the great difficulty of extinction.

The laser method for adjusting the speed parameters has been reduced. They have greater productivity, both in the process of drying, and in the process of processing the results of hair drying using the technology of computer technologies. Laser adjustment of shortness can be easily achieved using current technological lines. Computer processing of results using additional software significantly speeds up the hair removal process, so laser hair removal methods can stagnate in the minds of continuous hair removal.

**Key words:** surface roughness, profilogram, high-quality chavun, interference, laser interferometer, optical dimming, vibration, metrological indicators, laser profilograph, surface brightness.

**Вступ.** У процесі механічної обробки поверхні деталей отримують певну шорсткість, яка значною мірою впливає на тертя, зносостійкість, експлуатаційні властивості деталей, якість зображення для оптичних деталей (лінз, дзеркал, призм тощо), що робить необхідним вивчення її висотних, крокових і структурного параметрів [1]. Контроль шорсткості (чистоти) поверхонь є важливою кінцевою операцією технологічного процесу виготовлення виробів із металевих і неметалевих матеріалів на сучасному виробництві і виконуваний за допомогою контактних і безконтактних методів, кожен із яких має свої переваги і недоліки, галузі використання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Реальні поверхні деталей відрізняються від номінальних, геометрично правильних, наявністю нерівностей різного виду [2]. Зібрані з таких деталей з'єднання зазвичай працюють у більш жорстких умовах порівняно з розрахунковими. Наприклад, під час розрахунку питомого навантаження приймають площу контакту такою, що дорівнює номінальній, за умови, що діючі сили розподілені по ній рівномірно. Насправді завдяки наявності значних нерівностей реальних поверхонь навантаження сприймають тільки їхні окремі ділянки, складники фактичної площі контакту, і внаслідок цього навантаження

значно перевищує розрахункове, що призводить до інтенсивного початкового зносу деталей, виникнення вузлів схоплювання. У рухливих з'єднаннях нерівності поверхні можуть призвести до порушення плавності і точності переміщень, виникнення додаткових джерел теплоти, зміни характеру тертя в зонах контакту [3]. Усе це, як наслідок, впливає на надійність і довговічність машин і приладів. Тому необхідно вміти правильно оцінювати всі види нерівностей на реальних поверхнях деталей і прогнозувати їхній можливий вплив на експлуатаційні властивості виробів.

На реальних поверхнях деталей зазвичай виділяють такі види нерівностей: відхилення форми, тобто масштабні спотворення всієї поверхні; хвилястість поверхні, тобто сукупність періодичних нерівностей із відносно великим кроком і шорсткість поверхні, що є сукупністю нерівностей поверхні з відносно малим кроком на базовій довжині [4].

Шорсткість утворює мікрорельєф поверхні деталі. Вплив шорсткості на знос деталей не тільки пов'язаний із розмірами фактичної площини контакту, але і залежить від форми нерівностей поверхні.

Державним стандартом ДСТУ ISO 4287:2012 [5] визначено номенклатуру з шести параметрів, із яких для характеристики шорсткості вибирають один або декілька. Ці параметри такі: три показники висоти ( $R_a$  – середнє арифметичне відхилення;  $R_z$  – висота нерівностей профілю по 10 точках;  $R_{max}$  – найбільша висота нерівностей профілю), два крокові показники ( $S_m$  – середній крок нерівностей;  $S$  – середній крок нерівностей по вершинах), один висотно-кроковий показник (або структурний, це середній крок нерівностей профілю по середній лінії або середнє арифметичне значення кроку нерівностей профілю в межах базової довжини  $t_p$ ).

Для визначення параметрів шорсткості поверхні зазвичай

використовують такі методи: контактний – за допомогою зондових приладів (профілометрів і профілографів) і безконтактний – за допомогою оптичних приладів. Кожен із методів має свої переваги і недоліки, галузі використання.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є аналіз існуючих методів контролю шорсткості, визначення їхніх недоліків і переваг, галузей використання в умовах сучасного виробництва. Для того щоб забезпечити досягнення цієї мети, були поставлені та вирішені такі завдання: 1) визначити показники шорсткості; 2) проаналізувати контактні і безконтактні методи визначення показників шорсткості; 3) навести приклад використання контактної методу на прикладі високоміцного чавуну; 4) навести переваги і недоліки контактних і безконтактних методів визначення показників шорсткості в умовах сучасного виробництва, надати рекомендації щодо галузей їх використання.

**Основна частина дослідження.** Профілометричні контактні методи контролю призначені для фотографічного запису у збільшеному масштабі, а також візуальних спостережень або електричних вимірювань шорсткості поверхні [6-8]. Принцип дії заснований на реєстрації переміщення вимірювального щупа – спеціальної голки, яка знаходиться в контакті з досліджуваною поверхнею і відтворює профіль нерівностей у збільшеному масштабі за допомогою оптико-важільної системи (рис. 1).

Профілометри застосовують для контролю шорсткості поверхні з параметрами  $R_z = (0,4-20)$  мкм. Похибка вимірювань складає приблизно 10 %. Але основним недоліком цього методу є слід від щупа, що не дає змогу використовувати контактні вимірювання для полірованих поверхонь прецизійних деталей або тонких плівок.

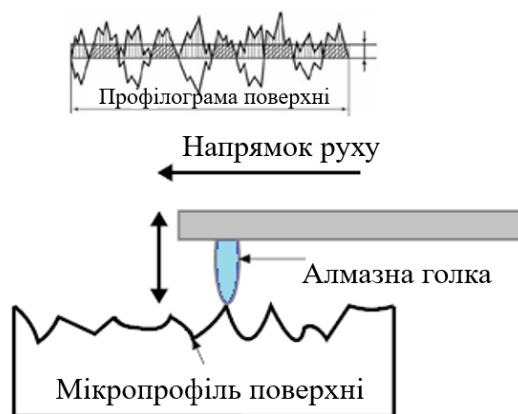


Рис. 1. Принципова схема контактного методу

Шорсткість формується в процесі механічної обробки і на її параметри впливає велика кількість факторів: мікроструктура та механічні властивості оброблюваного матеріалу (найбільший вплив має твердість), властивості інструментального матеріалу, геометричні параметри інструменту, наявність змащувально-охолоджувальної рідини, елементи режиму різання, вид обробки та ін.

Для експериментальної перевірки можливостей контактних методів контролю в умовах виробництва було досліджено шорсткість поверхонь зразків із високоміцного чавуну з кулястим графітом (ВЧКГ) із різною мікроструктурою матриці. Вимірювання виконували за допомогою портативного вимірювача шорсткості TR200, який забезпечує високу достовірність результатів у цехових умовах (рис. 2).



Рис. 2. Вимірювач шорсткості TR200

Вимірювач шорсткості (профілометр-профілограф) призначений для роботи в умовах виробництва і може бути використаний для вимірювання шорсткості поверхні деталей із різних матеріалів. Радіус алмазної голки щупа приладу – 5 мкм. Вимірювач розраховує параметри шорсткості відповідно до вибраної

методики і відображає на екрані профіль і всі виміряні параметри.

Профілограми поверхні деталей із ВЧКГ отримані після точіння надтвердим інструментальним матеріалом Total-10. Точіння виконували в однакових умовах. Візуалізація відповідних профілів шорсткості показана на рис. 3.

Узагальнені результати вимірювань і їхні кількісні характеристики наведено в таблиці. Аналіз даних таблиці, порівнюючи їх із профілограмами (рис. 3), показує чітку кореляцію між мікроструктурою (і твердістю) чавуну та якістю обробленої поверхні. Мікроструктура визначає твердість чавуну, а твердість впливає на показники шорсткості. Мінімальна шорсткість отримана після точіння чавуну, який піддавали гартуванню і низькому відпуску і має найбільшу твердість, із структурою мартенситу відпуску, максимальна – для чавуну в литому стані з

найменшою твердістю, який має структуру грубодисперсного перліту і фериту у вигляді облямівки навколо кулястих включень графіту. Спостерігають задовільну залежність висотних параметрів нерівностей від твердості – із збільшенням твердості висота нерівностей збільшується.

Профілометричний контактний метод вимірювання шорсткості рекомендований для оперативного моніторингу технологічного процесу в умовах сучасного машинобудівного виробництва, коли він забезпечує необхідну точність вимірювань і достатню продуктивність [9].

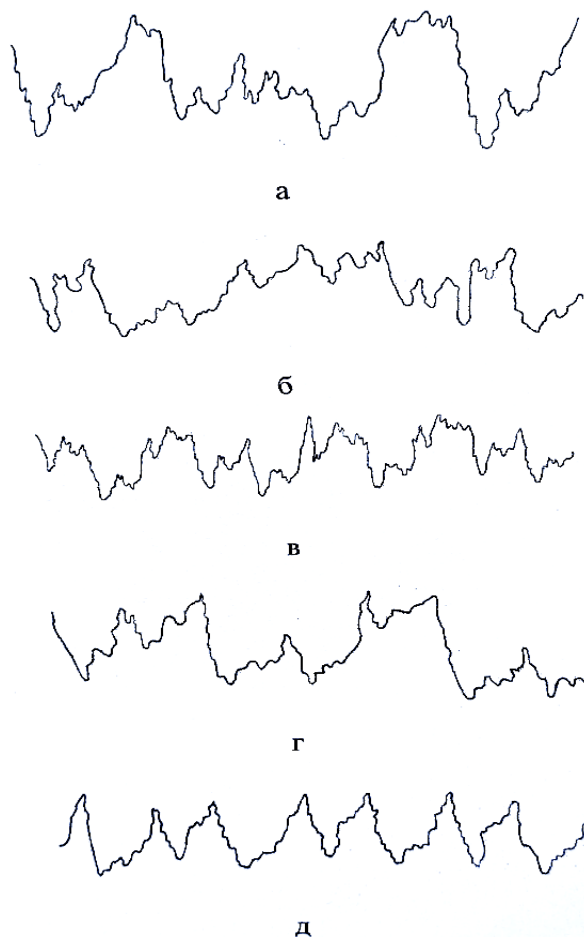


Рис. 3. Профілограми поверхні деталей із високоміцного чавуну після обробки надтвердим інструментальним матеріалом Tomal-10:  
 а – ВЧКГ у литому стані (№ 1); б – після подвійної нормалізації (№ 2);  
 в – після нормалізації (№ 3); г – після гартування і високого відпуску (№ 4);  
 д – після гартування і низького відпуску (№ 5)

## Характеристики шорсткості ВЧКГ

Параметр шорсткості, мм	Умовний номер чавуну				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
	Твердість, HBW				
	210-220	250-260	275-285	330-340	470-480
	Мікроструктура*				
	П (55 %) + Ф у вигляді облямівки + КГ	П (70 %) + Ф + КГ	П (85 %) + Ф + КГ	С <sub>в</sub> + Ф + КГ	М <sub>в</sub> + А <sub>3</sub> + КГ
R <sub>a</sub>	0,0013	0,001	0,00075	0,00073	0,00068
R <sub>z</sub>	0,0037	0,0035	0,0029	0,0037	0,0026
R <sub>max</sub>	0,0016	0,0042	0,0037	0,0016	0,0032
S <sub>M</sub>	0,1325	0,093	0,1125	0,168	0,11
S	0,054	0,071	0,04	0,091	0,034

Примітка. \*Ф – ферит, П – перліт, КГ – кулястий графіт, С<sub>в</sub> – сорбіт відпуску, М<sub>в</sub> – мартенсит відпуску, А<sub>3</sub> – аустеніт залишковий.

Точність методу обмежена радіусом щупа, який використовують у вимірювачі шорсткості, і характеристиками використовуваних приладів.

Існує ряд безконтактних оптичних методів вимірювання шорсткості: рефлексометричний, світлотіньового світіння, мікроінтерференційний і растровий.

Вимірювання шорсткості поверхні оптичними методами (такими як інтерферометрія, растровий метод, конфокальна мікроскопія) є сучасним та ефективним підходом, що має низку суттєвих переваг порівняно з класичними контактними методами (профілометрами).

Основні переваги оптичних методів вимірювання шорсткості:

1) безконтактний характер вимірювання унеможливорює пошкодження, подряпини або деформацію поверхні. Це критично важливо для роботи з м'якими матеріалами, дзеркальними поверхнями або тонкими плівками;

2) оптичні методи забезпечують високу роздільну здатність, даючи змогу вимірювати дуже дрібні відхилення від

форми (шорсткість, хвилястість) на рівні нанометрів;

3) оптичні системи допомагають отримати не лише 2D-профіль, а і повну 3D-карту поверхні (наприклад за допомогою лазерної скануючої мікроскопії), що забезпечує комплексне оцінювання параметрів шорсткості згідно зі стандартами;

4) оптичні методи допомагають проводити вимірювання у важкодоступних місцях – у глибоких отворах або на складних геометріях, де механічний щуп не може пройти;

5) оскільки немає механічного контакту, голка не зношується (не затуплюється), і не змінюються параметри показників шорсткості з часом, що зменшує витрати на обслуговування приладу.

Рефлексометричні методи оцінювання шорсткості поверхні, принцип дії яких заснований на використанні відбивної здатності оброблених поверхонь, що змінюється залежно від висоти мікронерівностей, є інтегральними і засновані на отриманні максимального відбитого світлового потоку від

досліджуваного виробу. Оцінюють якість поверхні за відношенням коефіцієнта відбиття контрольованої поверхні до коефіцієнта відбиття поверхні, прийнятої за еталонну. Рефлексометричний метод має низку переваг: простота, швидкість, об'єктивність. Проте точність вимірів невелика – лише 15 %. Крім того, на вимірювання впливає наявність пилу та забруднення на поверхні виробів.

Вимірювання шорсткості растровим методом дає змогу збільшити роздільну здатність приладу. На випробовувану поверхню накладають скляну пластину з нанесеною на неї растровою сіткою. Завдяки бічному освітленню в місцях мікронерівностей відбиття растрової сітки накладається на штрихи самої сітки – виникають смуги муара. Викривлення смуг, пропорційне висоті нерівностей, вимірюють за допомогою окулярного мікроскопа. Цей безконтактний метод допомагає ефективно оцінювати мікронерівності на грубо оброблених поверхнях ( $R_z$  від 80 до 320 мкм), його застосовують у метрології для контролю якості механічної обробки (точіння, шліфування) і виробів, отриманих литтям. Для надто грубих або, навпаки, гладких, полірованих поверхонь, а також поверхонь криволінійної форми точність суттєво знижується порівняно з профілометричним методом.

Метод світлового перерізу – це метод, за якого джерело світла проєктує вузьку щілину на контрольовану поверхню під певним кутом. Відбитий пучок світла утворює на поверхні світлову сходинку, що повторює профіль нерівностей. Завдяки тому, що осі тубуса і мікроскопа нахилені під кутом  $45^\circ$  до вимірюваної поверхні, вертикальні розміри мікронерівностей будуть збільшені в 1,41 рази порівняно з дійсними. Метод прийнятний для оцінювання середньої та грубої шорсткості поверхонь простої форми з висотою нерівностей  $R_z$  від 0,8 до 100 мкм.

Метод тіньового перерізу, або тіньовий, є розвитком методу світлового

перерізу (або методу ножа, що «світиться»), даючи змогу розглядати не світлу лінію на темному тлі, а темний профіль на світлому, що зручніше для грубих поверхонь.

Основний недолік оптичних приладів, що працюють за методами рефлексометричним, світлового перерізу, тіньового перерізу, – відносно велика трудомісткість вимірювання. Цього недоліку позбавлені інтерференційні або лазерні методи вимірювання параметрів шорсткості.

Інтерференційні методи призначені для вимірювання параметрів шорсткості поверхонь, у яких  $R_a = 0,02 \dots 1,0$  мкм. Основним приладом, що використовує принцип двопрменевої інтерференції для вимірювання розмірів тривимірних дефектів поверхні, є широко відомий мікроінтерферометр Лінника. Мікроінтерферометр за своєю оптичною схемою є поєднанням інтерферометра Майкельсона з мікроскопом [8]. Принцип дії цього приладу (рис. 4) заснований на порівнянні світлових хвиль, одержаних із відбиттям когерентних пучків світла від контрольованої та еталонної поверхонь.

Світло від джерела розділено на два пучки: один відбитий від еталонного дзеркала, інший – від досліджуваної поверхні. В окулярі відбувається інтерференція цих пучків, створюючи картину смуг, викривлення яких відповідає профілю рельєфу. Отримана картина збільшується в мікроскопі до величини, яка дає змогу виміряти параметри шорсткості за викривленням смуг. Сучасні моделі можуть бути оснащені відеокамерами та п'єзоелементами для автоматичної обробки результатів.

Багатопроменеві інтерферометри є більш досконаліми порівняно з двопроменевими. Вони дають змогу виявляти нерівності близько  $1 \cdot 10^{-3} \dots 2$  мкм. Принципова схема двопроменевого інтерферометра (рис. 5) ґрунтована на класичній схемі Фізо [10].

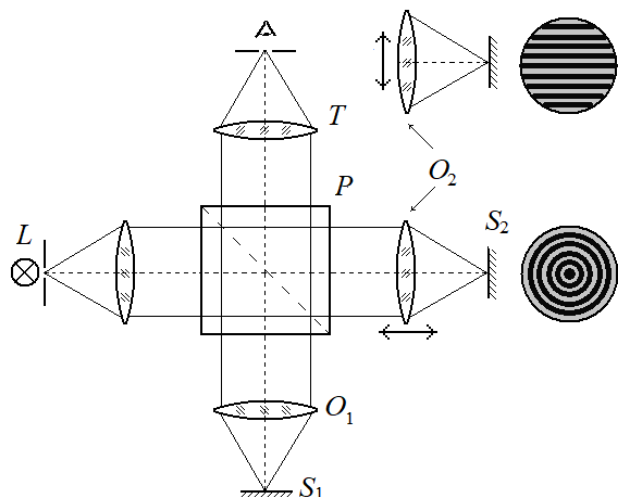


Рис. 4. Принципова схема мікроінтерферометра Лінника

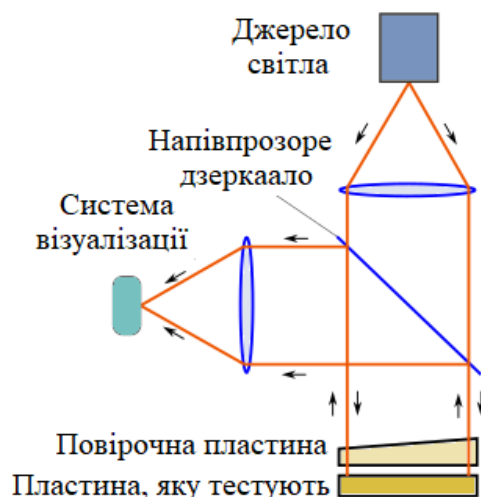


Рис. 5. Принципова схема мікроінтерферометра Фізо

Світловий промінь (зазвичай від He-Ne лазера,  $\lambda = 0,63 \dots 0,65$  мкм) проходить через еталонну пластину (еталон Фізо), відбивається від неї та від досліджуваної поверхні. Відбиті пучки інтерферують, створюючи картину.

Найбільш точним і зручним із лазерних методів вимірювання шорсткості є метод зсуву частоти випромінювання.

Лазерний інтерферометр зі зсувом частоти випромінювання (часто називають гетеродинним інтерферометром) — це високоточний оптичний прилад, у якому частоту одного або обох світлових пучків (опорного та вимірювального) штучно змінюють (зміщують) на певну величину  $\Delta f$ . Робота лазерного профілографа такого типу заснована на зміні оптичної довжини вимірювального плеча інтерферометра з постійною швидкістю.

Зміна оптичного шляху викликає фазовий зсув у сигналі биття, який легко детектує електроніка. Вихідне випромінювання лазера після проходження телескопічної системи направлено на сканувальний пристрій, що переміщує сфокусоване випромінювання лазера

вздовж вимірюваної поверхні з постійною швидкістю  $v_0$  (рис. 6).

Сканувальний пристрій складається з кубика з відбивною поверхнею і мікрооб'єктива, що допомагає сфокусувати на вимірюваній поверхні 1 лазерний пучок діаметром до 6...8 мкм. Відбите від поверхні випромінювання має доплерівський зсув частоти, пропорційний вертикальній складовій відносної швидкості руху поверхні, яку визначають кутом підймання освітленого елемента мікропрофілю.

Після вторинного проходження через сканувальний пристрій і резонатор лазера відбите випромінювання, прийняте фотоприймачем, посилюється і надходить на частотний детектор. Вихідний сигнал частотного детектора подається на інтегруючий підсилювач, що формує напругу, пропорційну миттєвому значенню висот мікронерівностей поверхні.

У лазерних профілографах застосовують також метод *послідовного перетворення фази* (рис. 7). Випромінювання лазера розщеплюється на два пучки, які сфокусовані об'єктивом на досліджувану поверхню.

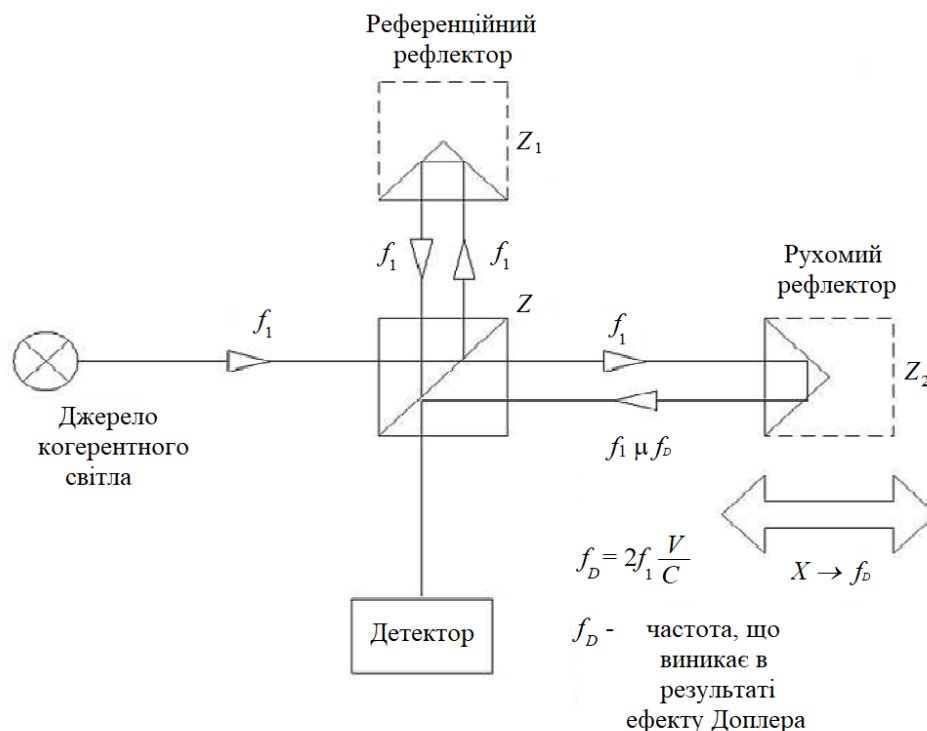


Рис. 6. Спрощена схема інтерферометра

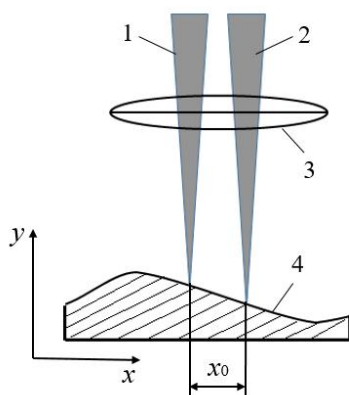


Рис. 7. Схема вимірювання параметрів шорсткості методом послідовного перетворення фази

Відбиті складові випромінювання знову збираються об'єктивом і після фотоелектронної обробки перетворюються в сигнал, пропорційний різниці довжин оптичних шляхів першого і другого променя. У процесі переміщення по досліджуваній поверхні за координатою  $x$  (або променів відносно поверхні) і

постійною відстанню  $x_0$  одержуваний сигнал буде пропорційний швидкості збільшення координати  $y$ . Після інтегрування цього сигналу на виході утворюються сигнали, пропорційні координаті  $y$  профілю поверхні.

Лазерні прилади вимірювання шорсткості легко вбудовані в сучасні техно-

логічні лінії [11]. Комп'ютерна обробка результатів за допомогою відповідного програмного забезпечення значно прискорює процес вимірювання, тому лазерні методи можна застосовувати в умовах безперервного виробництва. Отже, важлива перевага інтерференційних або лазерних методів порівняно з іншими оптичними методами в тому, що вони мають більшу продуктивність як у процесі вимірювання показників шорсткості, так і з обробкою результатів вимірювань за рахунок використання програмного забезпечення.

**Висновки.** Шорсткість поверхні деталей впливає на процеси тертя, експлуатаційні властивості виробів. Проведений аналіз показав, що вибір методу контролю шорсткості має бути базований на умовах виробництва: для цехового контролю деталей машинобудівних підприємств найбільш раціональними є

контактні методи (профілометри), тоді як безконтактні (оптичні) методи доцільно використовувати для атестації високоточних поверхонь.

На основі проведених експериментів встановлено, що мікроструктура і твердість високоміцного чавуну є визначальними факторами формування шорсткості. Із збільшенням твердості висотні показники шорсткості зменшуються.

Аналіз оптичних методів показав, що вони мають високу точність вимірювань, не пошкоджують поверхню деталі, на відміну від контактних методів визначення показників шорсткості, можуть бути використані для контролю якості м'яких матеріалів. З оптичних методів лазерні мають більшу продуктивність як у процесі вимірювання, так і обробки результатів вимірювань шорсткості за рахунок використання комп'ютерних технологій.

### Список використаних джерел

1. Дзюра, В. О., Марущак, П. О. (2021). *Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль*. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А.
2. Ковалевський, С. В., Онищук, С. Г. (2023). *Теоретичні основи технології виробництва деталей і складання машин у важкому машинобудуванні*. Краматорськ - Тернопіль: ДДМА.
3. Ніколаєнко, А., Шумакова, Т. (2022). Дослідження процесу формування поверхні деталей при вібраційній обробці. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 2 (272), 52-61. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-52-61>
4. International Organization for Standardization. (2021). *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters (ISO Standard No. 21920-2:2021)*.
5. *Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури*: ДСТУ ISO 4287:2012. (2013). Київ: Держспоживстандарт України.
6. *Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Правила і процедури оцінювання структури*: ДСТУ ISO 4288-2001. (2001). Київ: Держспоживстандарт України.
7. *Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції (GPS). Позначка зовнішньої текстури в технічній документації на продукцію* : ДСТУ EN ISO 1302:2018 (EN ISO 1302:2002, IDT; ISO 1302:2002, IDT). (2018). Київ: ДП «УкрНДНЦ».
8. Лалазарова, Н., Афанасьева, О., Комарова, Г., Литовка, Д. (2026). Вплив параметрів шорсткості на умови тертя і зносу деталей з високоміцного чавуну. *Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference «Scientific*

*Progress: Theories, Applications and Global Impact*». (pp. 293-296). March 2-4, 2026, Braga, Portugal. European Open Science Space. DOI 10.70286/EOSS-02.03.2026

9. Мачехін, Ю. П., Гнатенко, О. С. (2021). *Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч.2. Параметри лазерного випромінювання*. Харків: ФОП Панов А.М. ISBN 978-966-637-975-0

10. Bass, M., DeCusatis, C., & Enoch, J. (2010). *Handbook of optics: Volume I: Geometrical and physical optics, polarized light, components and instruments* (3rd ed.). McGraw-Hill Professional. ISBN 978-0-07-149889-0.

11. Reinhart, Poprawe. (2004). *Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Springer. ISBN 3-540-21406-2

### References

1. Dziura, V. O., & Marushchak, P. O. (2021). Tekhnolohichni metody zabezpechennia parametriv yakosti poverkhon til obertannia ta yikh profilometrychnyi kontrol [Technological methods for ensuring the quality parameters of surfaces of bodies of revolution and their profilometric control]. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian]

2. Kovalevskyi, S. V., & Onyshchuk, S. H. (2023). Teoretychni osnovy tekhnolohii vyrobnytstva detalei i skladannia mashyn u vazhkomu mashynobuduvanni [Theoretical foundations of the technology of parts production and machine assembly in heavy engineering]. Kramatorsk - Ternopil: DDMA. [in Ukrainian]

3. Nikolaienko A., & Shumakova T. (2022). Doslidzhennia protsesu formuvannia poverkhni detalei pry vibratsiinii obrobtisi [Research into the process of forming the surface of parts during vibration processing]. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2 (272), 52-61. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-52-61> [in Ukrainian]

4. International Organization for Standardization. (2021). *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters* (ISO Standard No. 21920-2:2021).

5. *Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Terminy, vyznachennia poniat i parametry struktury*: DSTU ISO 4287:2012. (2013). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy.

6. *Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Pravyla i protsedury otsinennia struktury*: DSTU ISO 4288-2001. (2001). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy.

7. *Tekhnichni vymohy do heometrychnykh kharakterystyk produktsii (GPS). Poznaka zovnishnoi tekstury v tekhnichnii dokumentatsii na produktsiiu* : DSTU EN ISO 1302:2018 (EN ISO 1302:2002, IDT; ISO 1302:2002, IDT). (2018). Kyiv: DP «Uk-rNDNTs».

8. Lalazarova, N., Afanasieva, O., Komarova, H., & Lytovka, D. (2026). Vplyv parametriv sharstkosti na umovy tertia i znosu detalei z vysokomicnoho chavunu [Influence of roughness parameters on friction and wear conditions of high-strength cast iron parts]. *Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference «Scientific Progress: Theories, Applications and Global Impact»*, Braga, Portugal, 293–296. European Open Science Space. DOI 10.70286/EOSS-02.03.2026 [in Ukrainian].

9. Machehin, Yu. P., & Hnatenko, O. S. (2021). *Lazerni, optyko-elektronni prylady ta systemy: Ch. 2. Parametry lazernoho vyprominiuvannia* [Laser, optoelectronic devices and systems: Part 2. Laser radiation parameters]. FOP Panov A. M. ISBN 978-966-637-975-0 [in Ukrainian].

10. Bass, M., DeCusatis, C., & Enoch, J. (2010). *Handbook of optics: Volume I: Geometrical and physical optics, polarized light, components and instruments* (3rd ed.). McGraw-Hill Professional. ISBN 978-0-07-149889-0.

11. Reinhart, Poprawe. (2004). *Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Springer. ISBN 3-540-21406-2

---

Афанасьєва Ольга Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичних основ електронної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Тел.: +38 (096) 525-62-35. E-mail: 7584839@ukr.net.

Комарова Ганна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Тел.: +38 (067) 999-85-77. E-mail: anna.kom3793@gmail.com.

Лалазарова Наталія Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Тел.: +38 (095) 390-38-16. E-mail: lalaz1932@gmail.com.

Попова Олена Георгіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства, Харківський національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ». <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852+38>. Тел.: +38 (067) 570-12-17. E-mail: o.popova@khai.edu.

Afanasieva Olga, PhD, Associate Professor, Physical Foundations of Electronic Engineering Department, National University of Radio Electronics. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Tel.: +38(096)-525-62-35. E-mail: 7584839@ukr.net.

Komarova Hanna, PhD, Associate Professor, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Tel.: +38 (067) 999-85-77. E-mail: anna.kom3793@gmail.com.

Lalazarova Nataliia, PhD, Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Tel.: +38 (095) 390-38-16. E-mail: lalaz1932@gmail.com.

Popova Olena, PhD, Associate Professor, Department of Composite Structures and Aviation Materials, Kharkiv National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852+38>. +38 (067) 570-12-17, o.popova@khai.edu/.

Дата надходження статті 03.03.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY