

МАЗУР МИКОЛА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9258-5741>e-mail: [mazurmy@khmnu.edu.ua](mailto:mazurmy@khmnu.edu.ua)

## ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ВИСОТИ ГРЕБІНЦІВ ШОРСТКОСТІ ПРИ ОБРОБЛЕННІ ПРОФІЛЮ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ОГИНАННЯ

В роботі наведено результати досліджень природи утворення гребінців шорсткості поверхні, обробленої багатолезовим інструментом методом огинання. Указані області використання одержаних залежностей та ступінь їх відповідності реальному обробленню.

**Ключові слова:** шорсткість поверхні, поверхня різання, твірна і напрямна інструментальної поверхні, подача.

MAZUR MYKOŁA

Khmelnitskyi National University

## DETERMINATION OF THE CALCULATED HEIGHT OF ROUGHNESS COMBS WHEN PROCESSING THE PROFILE OF PARTS BY THE ENVELOPING METHOD

The paper presents the results of studies of the nature of the formation of roughness ridges on a surface machined with a multi-blade tool by the enveloping method. It is indicated that the height of the actual irregularities consists of the height determined by the profile of the cutting edges of the tool, the feed and can be calculated, and some increase that depends on the processes of plastic deformation in the cutting zone, friction on the contact surfaces and other factors. Studies by various authors have established that at cutting speeds greater than 2 m/s the profile of the actual irregularities differs little from the calculated ones. The problem of determining the latter is especially complicated when machining surfaces by the enveloping method due to the great variety of shapes of the cutting edges and the complex kinematics of such processes. The paper proposes to determine the height of the irregularities as the sum of their components in the plane of the generating cutting surface and the guide. Despite the different shapes of the cutting edges, due to the small feed per cutting cycle at the contact points that form the roughness profile, this profile can be represented as formed by arcs of circles, the curvature of which is equal to the curvature of the cutting edge and the nominal cutting surface in the contact area. In the case of straight cutting edges or the nominal surface of the part, it is assumed that the radius of curvature is equal to infinity. Formulas of dependencies describing different shapes of cutting edges and nominal surfaces of the part are obtained, and recommendations for their use in various processing methods are also given. The error from the use of these dependencies does not exceed several percent, which is acceptable for technological calculations.

**Keywords:** surface roughness, cutting surface, generator and guide of the tool surface, feed.

Стаття надійшла до редакції / Received 24.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 28.11.2025

### Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Задача визначення форми та розмірів мікропрофілю (шорсткості) обробленої поверхні в більшості випадків вирішується двома способами: розрахунковим та експериментальним. Отримані результати значно різняться між собою, що обумовлено складним характером впливу процесів пластичної деформації в зоні різання на дійсний мікропрофіль поверхні деталі. Однак при швидкостях різання, більших 2 м/с, різниця між значеннями висоти мікропрофілю  $R_z$ , визначеної двома способами, стає практично незначною [1]. Зазначена область швидкостей різання зазвичай застосовується для багатолезових інструментів, оснащених твердим сплавом, тому в даному випадку розрахункові способи є можливими для використання,

### Аналіз досліджень та публікацій

В роботі [1] наведено основні причини, що приводять до відмінності між розрахунковими і дійсними нерівностями обробленої поверхні. Вказується, що ці відмінності зменшуються при великих швидкостях оброблення, характерних для багатолезових інструментів. Автори [3, 4] аналізують структуру шорсткості обробленої поверхні, особливості її вимірювання і вплив умов оброблення на її висоту. У даний час відома велика кількість розрахункових залежностей для визначення висоти нерівностей обробленої поверхні, область застосування яких обмежується конкретним видом інструмента та схемою різання. Застосування такого ж підходу до багатолезових інструментів, що працюють за складними схемами формоутворення, значною мірою не виправдано через значну різноманітність використовуваних схем оброблення. В роботі [2] аналізується геометрія нерівностей торової поверхні, обробленої методом огинання, але розглянуті тільки радіусні форми профілів різальної кромки і номінальної поверхні деталі та один із способів їх контакту. Поза межами уваги лишилось оброблення інструментами з прямолінійною різальною кромкою, а також охоплюючим інструментом.

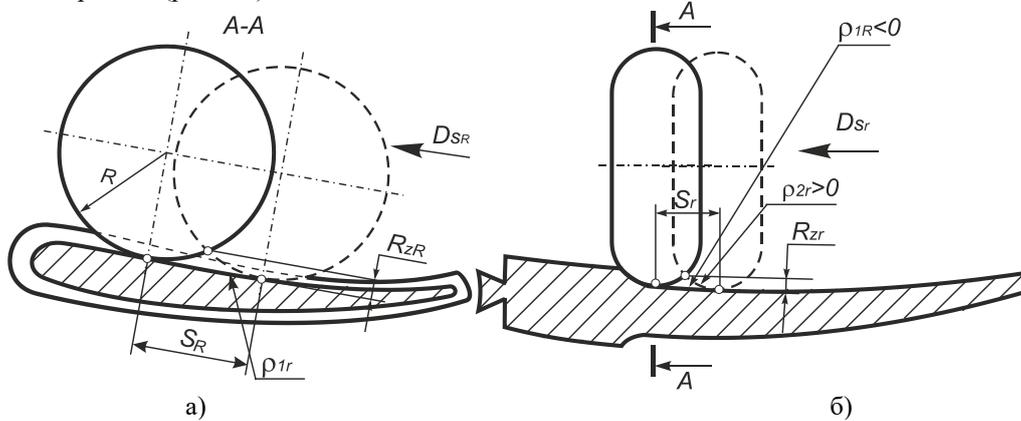
### Формулювання цілей статті

Метою роботи є: створення єдиних залежностей для обчислення розрахункової висоти гребінців шорсткості для інструментів, що працюють за методом огинання, а також встановлення областей їх допустимого використання.

**Виклад основного матеріалу**

Розв'язання цієї задачі розглянуто на прикладі оброблення турбінної лопатки дисковим інструментом з круговою різальною кромкою (рис. 1). Дисковий багатозубий інструмент спочатку обробляє одну стрічку поперечного профілю лопатки (рис.1, а), а потім відбувається зсув інструмента на відстань  $S_r$  для оброблення наступної стрічки (рис.1, б).

Гребінці шорсткості поверхні деталі є незрізаними частинами припуску за один цикл роботи інструменту. Їх мікропрофіль, зазвичай, міститься між точками дотику номінальної поверхні деталі (НПД) і поверхні різання (ПР) у двох послідовних її положеннях, зміщених за один цикл різання: у перерізі, нормальному до напрямної ПР, яке інструментів - тіл обертання - є осьовим перетином (рис.1, б) і у площині напрямної – кола обертання (рис.1, а).



**Рис. 1.** Схема визначення профілю гребінців шорсткості турбінної лопатки оброблюваної дисковим інструментом з круговою різальною кромкою методом огинання: а) - у площині напрямної ПР, б) - у площині твірної ПР

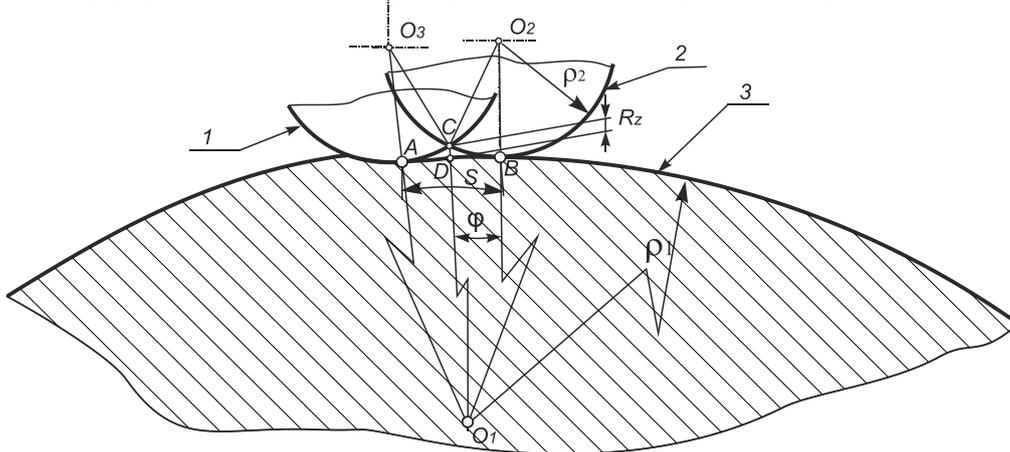
Сумарну висоту розрахункових нерівностей прийнято визначати за формулою [2]:

$$R_{zp\Sigma} = R_{zpr} + R_{zpr} \tag{1}$$

де  $R_{zpr}$  – висота поперечних нерівностей, виміряна у площині, дотичній до твірної інструментальної поверхні;

$R_{zpr}$  – висота поздовжніх нерівностей, виміряна у площині, дотичній до напрямної інструментальної поверхні.

Аналіз більшості способів оброблення НПД методом огинання показав, що внаслідок невеликого зміщення ПР за один цикл різання профілі кривих 1, 2 і 3 в районі точки А можна замінити дугами кіл, радіуси яких ( $\rho_1$  і  $\rho_2$ ) дорівнюють радіусам кривизни кривих 1 і 3 в точці А у відповідній площині (рис.2). Надалі прийнято, що  $\rho > 0$  якщо лінії перерізу опуклі, і  $\rho < 0$  - якщо увігнуті (для випадку, зображеного на рис.2  $\rho_1 > 0$  і  $\rho_2 > 0$ ).



**Рис. 2.** Схема визначення  $R_z$  при відсутності биття різальних кромки

Тоді з геометричних побудов маємо:

$$Rz = CO_1 - \rho_1,$$

- де  $\rho_1$ -радіус кривизни лінії перетину площини твірної ПР з НПД у точці А;

$\rho_2$  - радіус кривизни лінії осьового перерізу ПР у точці А,

$S$  - зміщення ПР за один цикл різання.

Проведемо деякі перетворення. За теоремою косинусів для трикутника  $CO_1O_2$ :

$$\rho_2^2 = (CO_1)^2 + (\rho_1 + \rho_2)^2 - 2(\rho_1 + \rho_2)CO_1 \cos\varphi,$$

де  $\varphi = S/2\rho_1$ . Звідки:

$CO_1 = Rz + \rho_1$ . Після перетворень:

$$Rz = \frac{\rho_1(\rho_1 + \rho_2)\cos\varphi - \rho_1^2 - \rho_1\rho_2}{\rho_1 - (\rho_1 + \rho_2)\cos\varphi}. \quad (2)$$

Так як кут  $\varphi$  при використуванні  $S$  досить малий, то значення  $\cos\varphi$  практично не відрізняється від 1. Підставимо це значення у знаменник виразу (2). Після перетворень будемо мати:

$$Rz = \frac{\rho_1(\rho_1 + \rho_2)\cos\varphi - \rho_1^2 - \rho_1\rho_2}{-\rho_2} = (\rho_1 - \rho_1\cos\varphi)(1 + \rho_1/\rho_2). \quad (3)$$

Вираз  $\rho_1 - \rho_1\cos\varphi$  визначає висоту  $h$  стрілки дуги довжиною  $S$  кола з (див.рис.2). Через малість  $S$  можна замінити дугу кола хордою. Тоді:

$$h = \rho_1 - \sqrt{\rho_1^2 - S^2/4}$$

Але таким же виразом визначається висота гребінця шорсткості при поздовжньому обточуванні різцем із круговою різальною кромкою радіуса  $\rho_1$ . Як відомо, ця формула замінюється спрощеною:

$$h = \rho_1 - \rho_1\cos\varphi \approx \rho_1 - \sqrt{\rho_1^2 - S^2/4} \approx S^2/8\rho_1. \quad (4)$$

Після підстановки виразу (4) у формулу (3) маємо:

$$Rz = S^2/8\rho_2 + S^2/8\rho_1. \quad (5)$$

Як видно із формул (4) і (5), перша частина виразу (5) визначає висоту стрілки дуги радіуса  $\rho_2$ , а друга – радіуса  $\rho_1$ . При  $\rho_1 > 0$  ці значення віднімаються (рис.3, №1), а при  $\rho_1 < 0$  (див. рис.3, №2) - додаються. Тому у наближеній формулі (5) буде очевидним знак «мінус». Ці два випадки мають місце при  $\rho_2 > 0$ . Разом з тим, поверхня деталі може утворюватися огинаючими прямолінійними різальними кромками  $\rho_2 = \infty$  (оброблення евольвентного профілю зубчатих коліс зубостругальною гребінкою) або охоплюючим інструментом  $\rho_2 < 0$  (нарізання крупної різі і черв'яків охоплюючими головками).

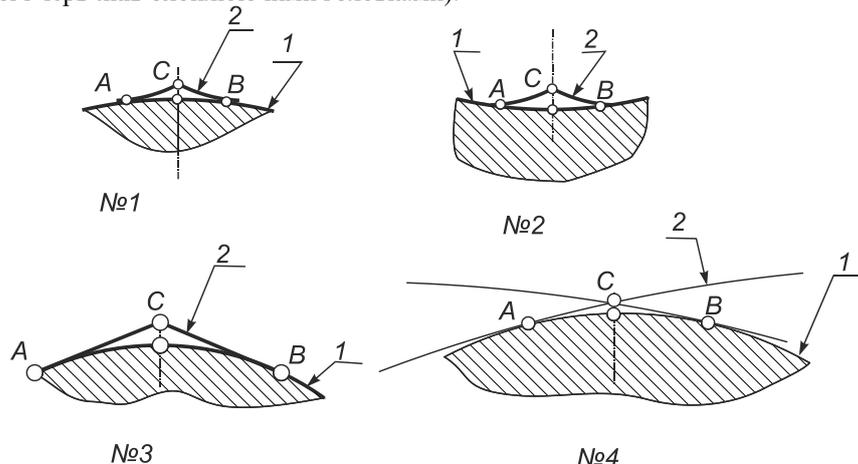


Рис. 3. Варіанти утворення гребінця шорсткості при обробленні методом огинання: №1 – випуклі ПР і НПД; №2 – випукла ПР і ввігнута НПД; №3 – прямолінійна ПР і випукла НПД; №4 – ввігнута (охоплююча) ПР і випукла НПД.

Застосування формули (5) для випадку №3 (див.рис.3) при  $\rho_2 = \infty$ , тобто різальна кромка інструменту є пряма лінія (рис.4) не є очевидним. Для доказу цього повернемо поверхню деталі і різальну кромку 2 відносно вершини гребінця шорсткості (точки А) до співпадіння кромки 2 із кромкою 1 (рис.4, б). Одержимо схему утворення гребінця шорсткості такої ж висоти між двома положеннями кругового профілю НПД.

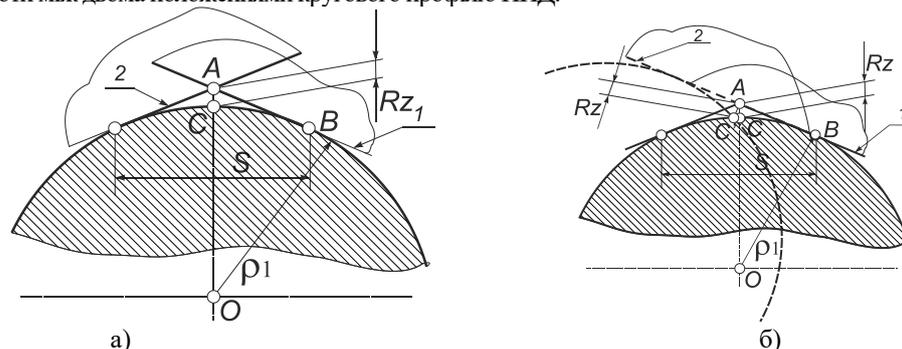


Рис. 4. Схема визначення  $Rz$  при формоутворенні прямолінійними різальними кромками: а) – загальний вигляд; б) – після повороту НПД

Висота цього гребінця визначається формулою (5) при  $\rho_2 = \infty$ .

$$Rz = S^2 / 8\rho_1.$$

Тоді остаточний вираз для розрахунку висоти гребінця шорсткості НПД, обробленої методом огинання буде одержано після перетворення формули (5):

$$Rz = \frac{S^2}{8} (1/\rho_2 \pm 1/\rho_1). \quad (6)$$

Знак (-) використовується, коли  $\rho_2 > 0$  (див. рис. 3, №1 і №2), а знак (+) – коли  $\rho_2 = \infty$  (див. рис. 3, №3) або  $\rho_2 < 0$  (див. рис. 3, №4).

Відносна похибка при використанні формули (6) замість формули (2) не перевищує декількох відсотків, що є допустимим. Ця формула охоплює всі можливі варіанти взаємного розміщення, форми і розмірів номінальної поверхні деталі і поверхні різання. Підставивши вираз (6) у формулу (1) для визначення сумарної висоти розрахункових нерівностей, одержимо остаточну залежність:

$$Rz = \frac{S_r^2}{8} (1/\rho_{2r} \pm 1/\rho_{1r}) + \frac{S_R^2}{8} (1/\rho_{2R} \pm 1/\rho_{1R}).$$

#### Висновки з даного дослідження

##### і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Шляхом теоретичного аналізу схем формоутворення профілю деталі методом огинання одержані спрощені залежності для визначення розрахункової висоти нерівностей оброблених поверхонь деталі. Вони можуть служити основою для призначення режимів різання та геометричної форми різальної кромки інструментів.

#### Література

1. Клименко С.А. Микронеровности поверхности при лезовой обработке: закономерности формирования // Доповідь на науковій конференції КЗЯТПС 2023. НУ "Чернігівська політехніка". [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=Q0FzG3w3pYc&t=5s> (дата звернення 20.09.2024).
2. Мазур М.П. Визначення розмірів нерівностей при обробці торцевих поверхонь дисковим багатокромковим інструментом / М.П. Мазур, В.П. Ткачук, К.С. Соколан // Матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», т.1, 25-26 травня 2023 року, м. Чернігів, НУ "Чернігівська політехніка". – с. 198-199.
3. K. E. Oczos, V. Liubimov, Geometrical Structure of Surface (in Polish), Technical University of Keszcz6w, 2003.hup / [www.taylor-hobson.com/talysurfcci\\_ret}ucst.htm](http://www.taylor-hobson.com/talysurfcci_ret}ucst.htm).
4. M. Field, J.F. Kahles, Review of surface integrity of machined components, CIRP Annals, Vol. 20/2 (1971), 153-163.

#### References

1. Klymenko S.A. Mikronerivnosti poverkhni pry lezovoi obrobtsi: zakonimosti formuvannya // Dopovid na naukovii konferentsii KZiATPS 2023. NU "Chernihivska politekhnika". [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.youtube.com/watch?v=Q0FzG3w3pYc&t=5s> (data zvernennia 20.09.2024)
2. Mazur M.P. Vyznachennia rozmiriv nerivnostei pry obrobtsi tortsevykh poverkhon diskovym bahatokromkovym instrumentom / M.P. Mazur, V.P. Tkachuk, K.S. Sokolan // Materialy tez dopovidei KhIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system», t.1, 25-26 travnia 2023 roku, m. Chernihiv, NU "Chernihivska politekhnika". – s. 198-199.
3. K. E. Oczos, V. Liubimov, Geometrical Structure of Surface (in Polish), Technical University of Keszcz6w, 2003.hup / [www.taylor-hobson.com/talysurfcci\\_ret}ucst.htm](http://www.taylor-hobson.com/talysurfcci_ret}ucst.htm).
4. M. Field, J.F. Kahles, Review of surface integrity of machined components, CIRP Annals, Vol. 20/2 (1971), 153-163.