

УДК 621.913:621:633

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ ЗУБОХОНІНГУВАННЯ АЛМАЗНИМИ ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ХОНАМИ НА ПАРАМЕТРИ ШОРСТКОСТІ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

**А.В. Кривошея<sup>1</sup>,**

канд. техн. наук, с.н.с.

**Є.О. Пашенко<sup>1</sup>,**

докт. техн. наук, професор

**В.С. Мельник<sup>2</sup>,**

канд. техн. наук

**К.К. Щербина<sup>3</sup>,**

канд. техн. наук

<sup>1</sup>*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України*

<sup>2</sup>*Державний науково-дослідний інститут МВС України*

<sup>3</sup>*Центральноукраїнський національний технічний університет*

DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.296-311

Запропоновано новий процес зубохонінгування зубчастих коліс алмазними черв'ячними еластичними хонами. Проведена оцінка зміни величин параметрів шорсткості при зубохонінгуванні циліндричних евольвентних зубчастих коліс. Проведено порівняння параметрів шорсткості поверхонь до та після обробки.

**Ключові слова:** шорсткість, зубчасті колеса, зубохонінгування, черв'ячний хон, фінішна обробка.

**Вступ.** Від якості циліндричних зубчастих передач, як важливої складової частини більшості машин та механізмів, залежить якість машини або механізму в цілому. Якість циліндричних зубчастих передач залежить від їх точності і стану робочого поверхневого шару їх зубчастих вінців, що впливає на експлуатаційні та інші показники передач. Так шорсткість, як один із важливих показників робочих поверхневих шарів контактуючих поверхонь зубчастих передач, впливає на такі їх показники як: міцність, зносостійкість, довговічність, герметичність з'єднання, корозія, тертя, зношування, змащування, протікання рідини, магнітні властивості [1]. Інтенсивність зношування від параметрів шорсткості має екстремальний характер [1]. Шорсткість впливає на знос контактуючих поверхонь і шум в роботі в період припрацювання зубчастих коліс, а також на необхідний момент сил при запуску або зрушенні механізму. Однією з ефективних технологічних операцій при фінішній обробці зубчастих коліс, що впливає на показники шорсткості, є зубохонінгування. Традиційний спосіб зубохонінгування виконується на спеціальних зубохонінгувальних верстатах методом обкату в двухпрофільному або однопрофільному зачепленні на схрещених осях

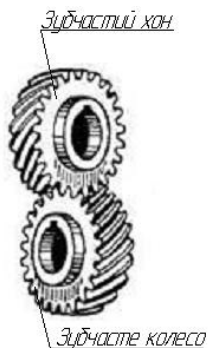


Рис. 1. Схема традиційного зубохонінгування зубчастого колеса дисковим абразивним зубчастим хоном

дискових абразивних зубчастих хонів (АЗХ) і зубчастих коліс (рис. 1) [2-4].

Зубохонінгування забезпечує усунення дефектного шару після попередньої термообробки, або іншої обробки та зменшення висотних параметрів шорсткості поверхні зубців зубчастих коліс при тій же практично точності обробки [2-4].

Але традиційний спосіб зубохонінгування дисковими АЗХ має цілий ряд недоліків, а саме:

- для процесу зубохонінгування АЗХ необхідно використовувати спеціальні зубохонінгувальні верстати, вартість яких сягає сотень тисяч євро, наприклад, зубохонінгувальні верстати фірми Fassler. В Україні зубохонінгувальні верстати не виготовляють;
- технологія виготовлення дискових АЗХ, особливо алмазних, є складною, трудомісткою і затратною;
- при зубохонінгуванні зубчастих коліс дисковими АЗХ виникають значні динамічні навантаження, що може призвести до руйнування зубів АЗХ;
- при обробці АЗХ також виникає нерівномірність шорсткості по висоті зуба оброблювального зубчастого колеса, через різні швидкості різання по висоті зуба.

Тому, враховуючи вищеприведені недоліки, розробка більш ефективних способів зубохонінгування зубчастих коліс, які дозволяють в певному діапазоні керувати параметрами шорсткості, є актуальними для вітчизняного машинобудування.

**Аналіз літератури.** Процес зубохонінгування АЗХ зубчастих коліс досліджувався в працях М.Г. Сторчака, Е.М.Гулди, Ю.М. Сухорукова, С.Н. Калашникова, Б.А. Тайца та на зарубіжних фірмах Gleason, Kapp, Liebherr, Fassler, Samputensili, Koepfer. [2-12].

Провідні закордонні фірми Gleason, Kapp, Liebherr, Fassler, Samputensili, Koepfer, які займаються технологією фінішної обробки зубчастих коліс складнопрофільними інструментами виходять на рівень ноу-хау та приховують свої секрети. Так, наприклад розробки фірм Kapp та Fassler по технології зубохонінгування абразивним дисковим зубчастим хоном з внутрішніми зубцями та алмазної шестерні для правки такого зубчастого абразивного хону є трудомісткими, затратними та поки не піддаються копіюванню [8, 10].

Всі наведені вище іноземні фірми пропонують купівлю свого верстатного обладнання високої вартості та швидкозношувального складнопрофільного інструменту і тому впровадження зарубіжної технології зубохонінгування є дуже затратним і не всі підприємства можуть дозволити собі впровадження її у виробництво.

В Інституті надтвердих матеріалів НАН України розроблений спосіб зубохонінгування зубчастих коліс алмазними черв'ячними еластичними хонами (АЧЕХ) на серійних горизонтально-фрезерних або плоскошліфувальних модернізованих верстатах [13]. На першому етапі досліджень процесу зубохонінгування АЧЕХ вивчали зміну найбільш інформативного показника шорсткості  $R_a$  – (середнє арифметичне відхилення висоти профілю шорсткості) вздовж лінії зуба зубчатого колеса [14]. Однак заміри параметра  $R_a$  тільки вздовж лінії зуба – не містить інформацію з просторової структури поверхні та не розрізняє піки і западини [1]. Згідно ДСТУ ISO 4287:2012 існують додаткові параметри відхилення висотних параметрів профілю шорсткості поверхні  $R_{max}$  (найбільша висота нерівності профіля або відстань між лінією виступів і лінією западин),  $R_z$  (висота по 10 точкам),  $R_q$  (середня квадратична шорсткість) які використовуються для більш інформативної оцінки шорсткості поверхонь.

**Мета роботи** – визначення впливу процесу зубохонінгування зубчастих коліс на серійному горизонтально-фрезерному верстаті черв'ячними алмазними еластичними хонами на величини параметрів шорсткості  $R_{max}$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  шляхом замірів їх параметрів до і після обробки.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** В якості дослідних зразків використовувалися зубчасті колеса шестеренних гідронасосів і гідромоторів.

При виготовленні зубчастих коліс гідронасосів одна з перспективних технологій їх виготовлення включає: чорнове зубофрезерування, цементацію, чистове зубофрезерування твердосплавними черв'ячними фрезами «FETTE» і зубохонінгування.

Для зубохонінгування були розроблені нові інструменти – АЧЕХ, що складаються з еластичних алмазоносних півкілець які закріплюються в гвинтових пазах алюмінієвого корпусу інструменту рис. 2. Технологія виготовлення еластичних алмазних кілець, така сама як і інших алмазних інструментів на еластичних зв'язках.

Для точного виготовлення алмазоносних кілець після спікання проводилось їх шліфування по товщині і по профілю в потрібний розмір рис. 3.



Рис. 2. Пів кільця алмазного зубчатого хона

Корпуси для черв'ячного алмазного хона виготовлялися із алюмінієвого сплаву Д16Т рис. 4.

На відміну від традиційних алмазних дискових зубчастих хонів представлені алмазні черв'ячні еластичні хони мають більш просту

конструкцію і технологію виготовлення.

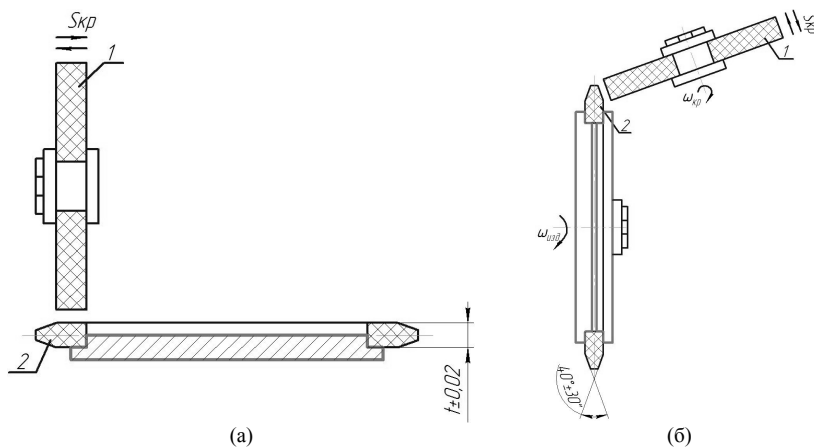


Рис. 3. Шліфування алмазного кільця на еластичній зв'язці по товщині (а) і по профілю (б) після спікання, де 1 – абразивний круг; 2 – алмазне кільце на еластичній зв'язці

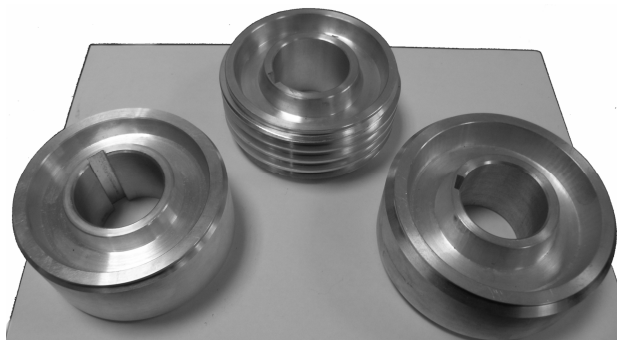


Рис. 4. Корпуса хонів з нарізаними гвинтовими канавками (по середині) і без них

При виготовленні дослідних зразків АЧЕХ алмазозносні кільця розрізалися на два півкільця і кожне півкільце нагвинчувалося в гвинтовий паз алюмінієвого корпусу і закріплювалося спеціальним клеєм рис. 5.

При обробці АЧЕХ закріплюється на шпинделі стандартного горизонтально-фрезерного верстату мод. 6М82Ш. А в Т-подібних пазах столу верстата встановлювалось спеціальне пристосування для закріплення оброблювальних зубчастих коліс. Пристосування забезпечує пружний зв'язок в парі алмазний черв'ячний хон – зубчасте колесо рис. 6.

При обробці використовували мастильно-охолоджуюче технологічне середовище (СОТС) гас з 10 відсотковим вмістом індустріального масла

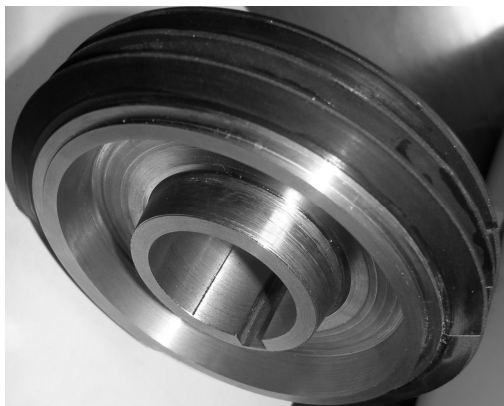


Рис. 5. Черв'ячний алмазний еластичний хон в зборі

шорсткості  $R_{max}$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  до і після обробки відповідно до ДСТУ ISO 4287:2012 [12].

И-20А. Використання СОТС сприяє видаленню з зони обробки продуктів зносу хона і шламу.

Для визначення впливу зернистості алмазів на шорсткість при зубохонінгуванні були виготовлені два хона з алмазних порошоків різної зернистості АС6 80/63 і АСМ 28/20.

При дослідженні процесу зубохонінгування замірялися параметри



Рис. 6. Обробка зубчастого колеса алмазним черв'ячним еластичним хоном

Шорсткість евольвентної поверхні зубчастих коліс. вимірювали по двох напрямках, вздовж евольвентного профілю і вздовж лінії зуба

Так шорсткість вимірювання проводили по трасі 0,75 мм при кроці відсічення 0,25 мм.

За результатами експериментів побудовані графіки, для представлення замірів шорсткості до і після зубохонінгування та побудовані криві розсіювання їх величин (рис. 6-17) [17].

Як видно з наведених графіків шорсткість  $R_{max}$  по профілю зменшується в середньому на 0,8 мкм. При використанні алмазних порошоків АС6 80/63 і АСМ 28/20 показники шорсткості змінюються не суттєво див. рис. 7-10. На рис 6-17 По осі  $OX$  відкладаються чисельні значення висотних параметрів профілю шорсткості, а по осі  $OY$  вказана щільність розподілу.

Зазначимо, що площа під кривою на заданому відрізку дорівнює ймовірності попадання випадкової величини в цей проміжок.

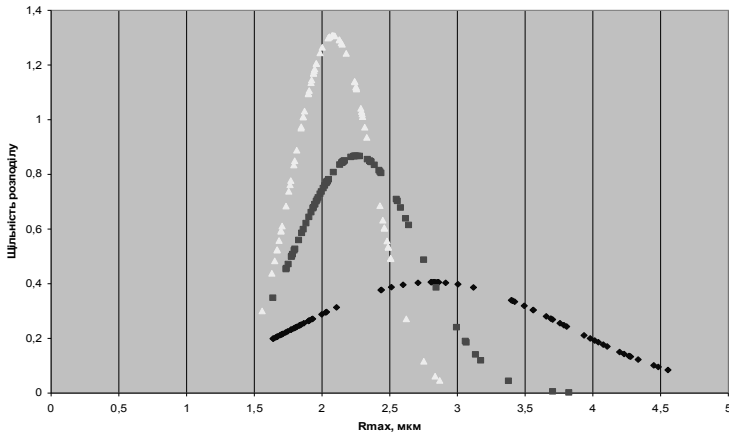


Рис. 7.  $R_{max}$  вздовж профіля після зубофрезерування (ромби), після зубохонінгування 4 проходів (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АС6 80/63 Режими обробки  $n(\text{хона})=2000\text{об/хв.}$ ,  $V_{pr}=25$  мм/мин,  $S_{рад}=0,5$  мм

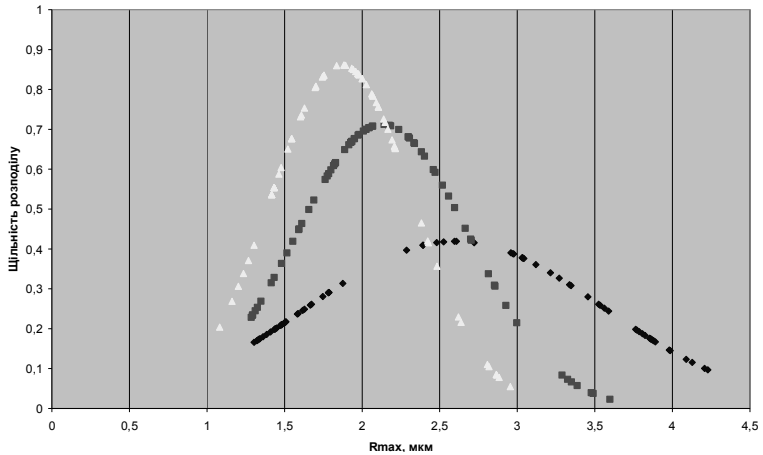


Рис. 8.  $R_{max}$  вздовж профіля після зубофрезерування (ромби), після зубохонінгування 4 проходів (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АСМ 28/20, Режими обробки  $n(\text{хона})=2000\text{об/хв.}$ ,  $V_{pr}=25$  мм/мин,  $S_{рад}=0,5$  мм

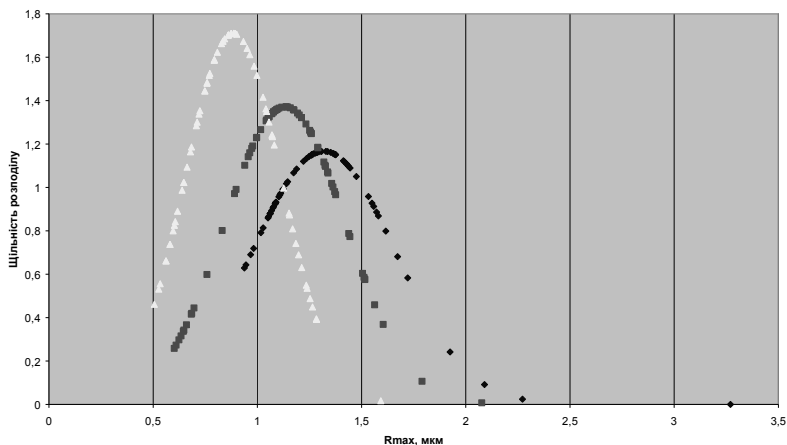


Рис. 9.  $Rz_{max}$  вздовж лінії зуба після зубофрезерування (ромби), після зубохонінгування 4 проходів (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АС6 80/63 Режими обробки  $n(\text{хона})=200\text{об/хв.}$ ,  $V_{пр}=25\text{ мм/мин}$ ,  $S_{рад}=0,5\text{ мм}$

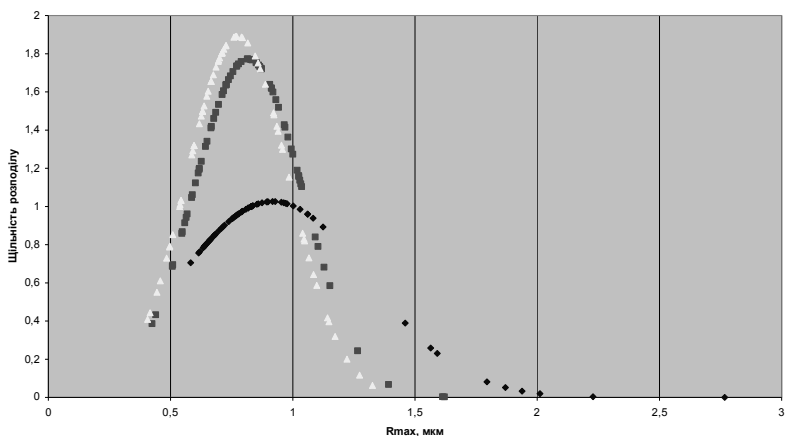


Рис. 10.  $Rz_{max}$  вздовж лінії зуба після зубофрезерування (ромби), після зубохонінгування 4 проходів (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АСМ 28/20 Режими обробки  $n(\text{хона})=200\text{об/хв.}$ ,  $V_{пр}=25\text{ мм/мин}$ ,  $S_{рад}=0,5\text{ мм}$

Розглянемо параметр шорсткості  $R_q$  – середня квадратична шорсткість. Наразі вважається, що параметр  $R_a$  є малочутливим до елементів топографії поверхні (піків і западин), тому віддають перевагу іншому амплітудному (висотному) параметру  $R_q$ .

В більшості випадків  $R_a$  приблизно дорівнює  $0,8R_q$ , що і підтверджується наступними графіками рис. 11-14.

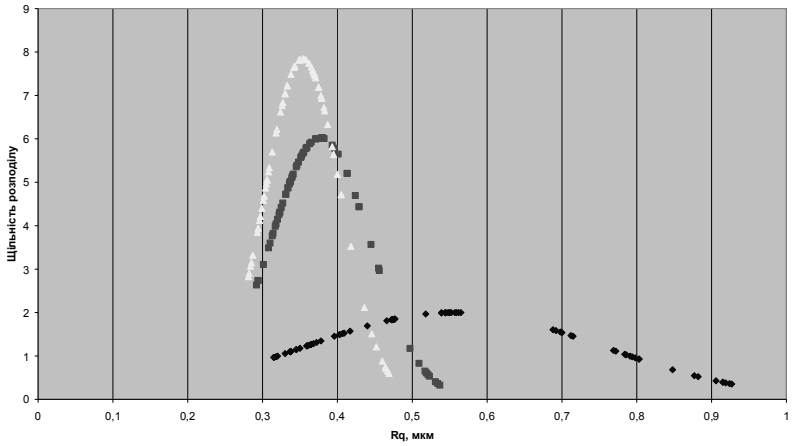


Рис. 11. Rq вздовж профіля після зубофрезерування (ромби), після алмазного зубохонінгування 4 проходу (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АС6 80/63 Режими обробки  $n(\text{хона})=200\text{об/хв.}$ ,  $V_{\text{пр}}=25\text{ мм/мин}$ ,  $S_{\text{рад}}=0,5\text{ мм}$

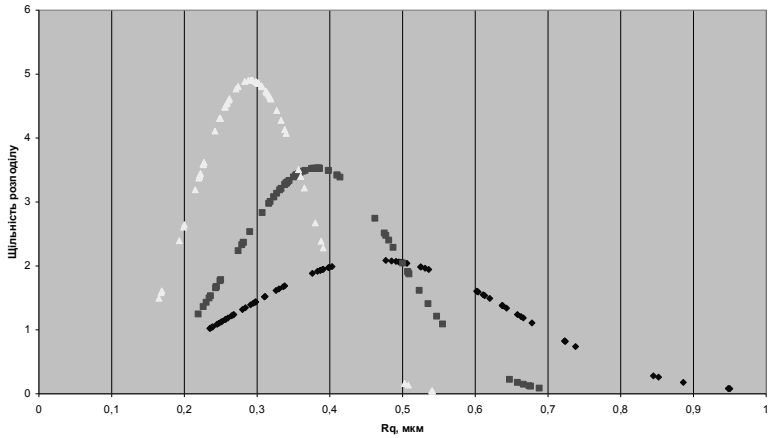


Рис. 12. Rq вздовж профіля після зубофрезерування (ромби), після зубохонінгування 4 проходу (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АСМ 28/20 Режими обробки  $n(\text{хона})=200\text{об/хв.}$ ,  $V_{\text{пр}}=25\text{ мм/мин}$ ,  $S_{\text{рад}}=0,5\text{ мм}$



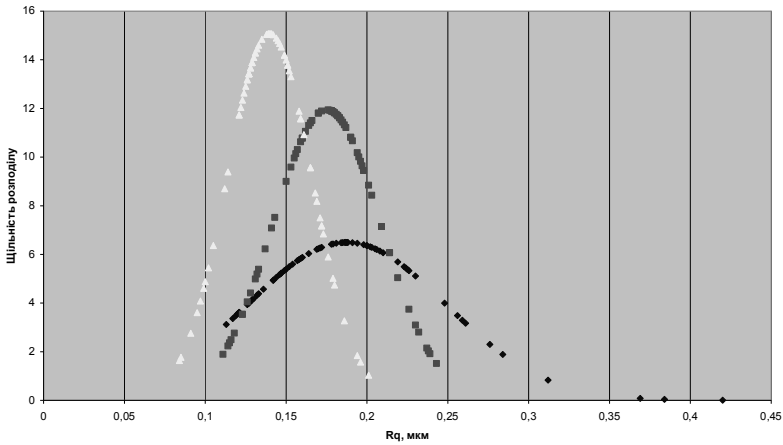


Рис. 13. Rq вздовж лінії зуба після зубофрезерування (ромби), після зубохонінгування 4 проходу (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АС6 80/63 Режими обробки  $n(\text{хона})=200\text{об/хв.}$ ,  $V_{\text{пр}}=25\text{ мм/мин}$ ,  $S_{\text{рад}}=0,5\text{ мм}$

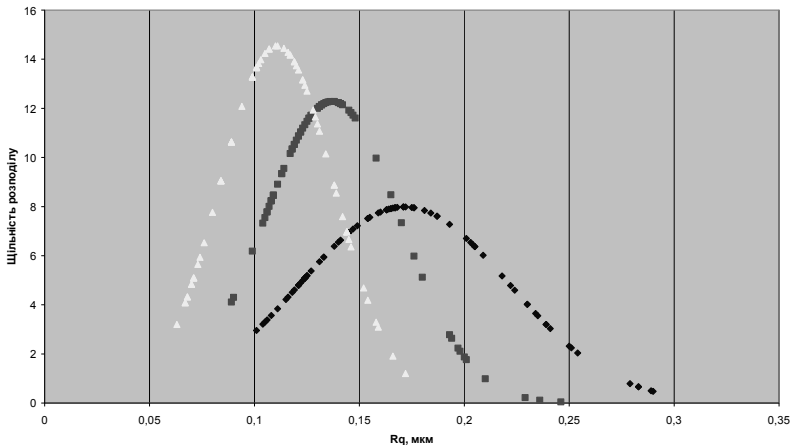


Рис. 14. Rq вздовж лінії зуба після зубофрезерування (ромби), після зубохонінгування 4 проходу (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АСМ 28/20 Режими обробки  $n(\text{хона})=200\text{об/хв.}$ ,  $V_{\text{пр}}=25\text{ мм/мин}$ ,  $S_{\text{рад}}=0,5\text{ мм}$

З наведених величин параметра шорсткості Rq видно, що при зубохонінгуванні шорсткість зменшується, як вздовж евольвентного профілю так і вздовж лінії зуба, що корегується з наведеними раніше змінами параметрами шорсткості Ra.

Порівняння Rz і Rmax використовуються для контролю відхилень чистоти обробленої поверхні. Подібність величин Rz і Rmax вказує на однорідну чистоту поверхні, в той час як значна різниця між ними свідчить про дефект поверхні на в цілому однорідній поверхні рис. 15-18. [1].

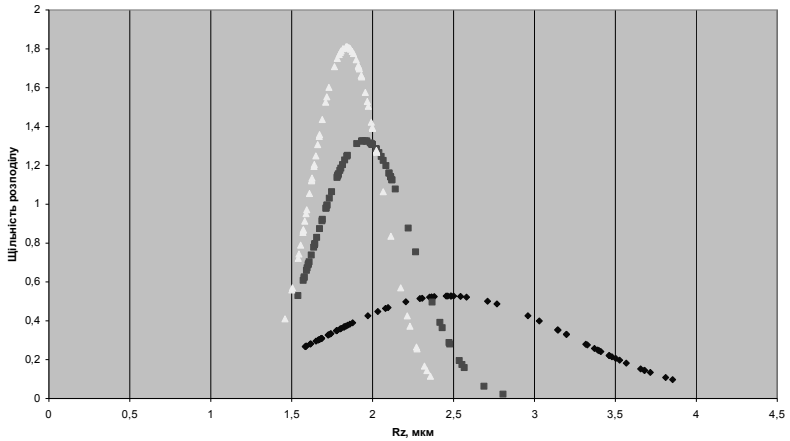


Рис. 15. Rz вздовж профіля після зубофрезерування (ромби), після зубохонінгування 4 проходу (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АС6 80/63 Режими обробки  $n(\text{хона})=2000\text{об/хв}$ .  $V_{\text{пр}}=25\text{ мм/мин}$ ,  $S_{\text{рад}}=0,5\text{ мм}$ .

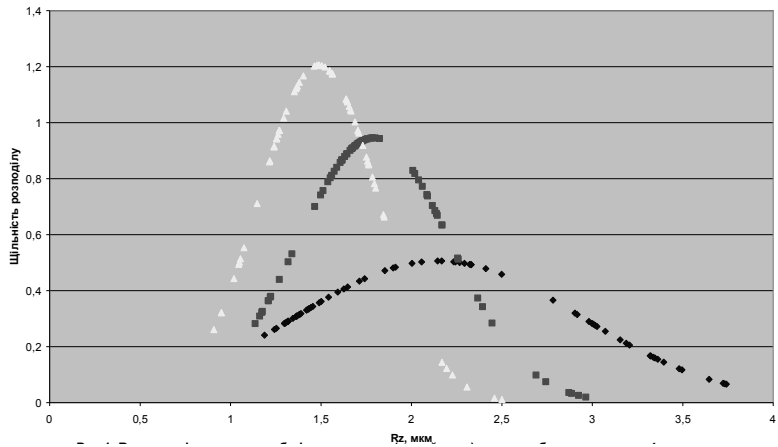


Рис. 16. Rz вздовж профіля після зубофрезерування (ромби), після зубохонінгування 4 проходу (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АСМ 28/20 Режими обробки  $n(\text{хона})=2000\text{об/хв}$ .  $V_{\text{пр}}=25\text{ мм/мин}$ ,  $S_{\text{рад}}=0,5\text{ мм}$ .

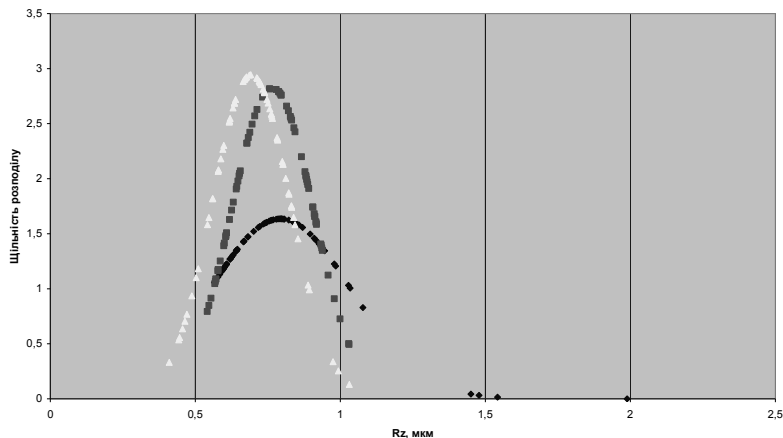


Рис. 17. Rz вздовж лінії зуба після зубофрезерування (ромби), після зубохонінгування 4 проходу (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АС6 80/63 Режими обробки  $n(\text{хона})=200\text{об/хв}$ .  $V_{\text{пр}}=25\text{ мм/мин}$ ,  $S_{\text{рад}}=0,5\text{ мм}$ .

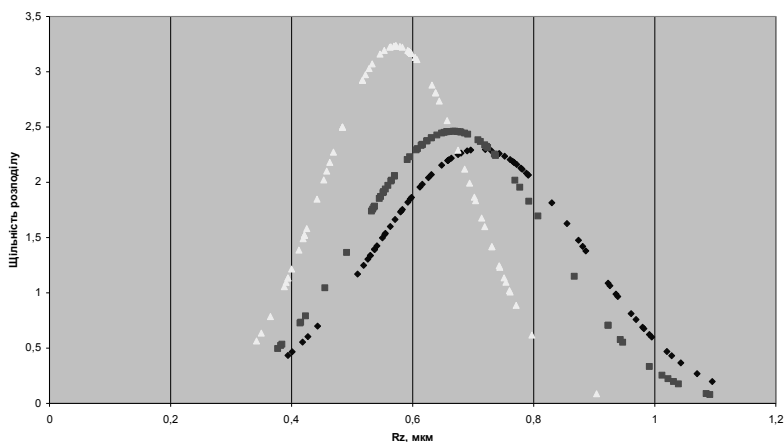


Рис. 18. Rz вздовж лінії зуба після зубофрезерування (ромби), після зубохонінгування 4 проходу (квадрати) і 12 проходів (трикутники). Характеристика хона АСМ 28/20 Режими обробки  $n(\text{хона})=200\text{об/хв}$ .  $V_{\text{пр}}=25\text{ мм/мин}$ ,  $S_{\text{рад}}=0,5\text{ мм}$ .

З наведених величин Rz і Rmax видно, що ці величини подібні. З чого можна зробити висновок, що дефекти на поверхні відсутні і навіть іде виправлення дефектів попередніх операцій обробки. Крім того видно, що іде усунення сліду фрези від попередньої обробки рис. 19.

На рис. 19 (а) представлена поверхня зуба до зубохонінгування з слідами черв'ячної фрези, які йдуть вздовж евольвентного профілю зуба, на рис. 19 (б) після зубохонінгування ці сліди фрези відсутні.

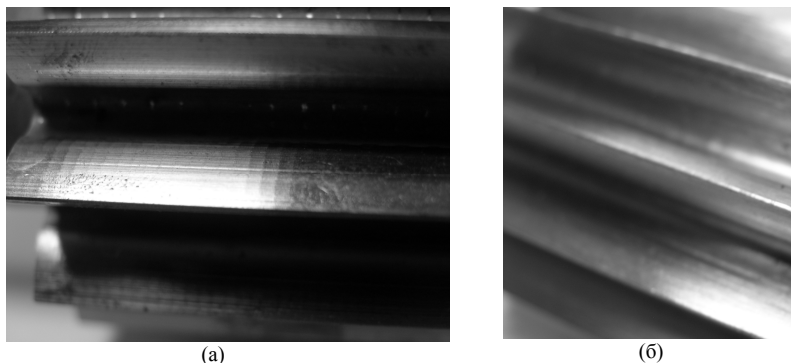


Рис. 19. Поверхня зубчастого колеса до та після обробки алмазним зубохонінгуванням

**Висновки.** У результаті проведеної роботи показано вплив обробки алмазними черв'ячними еластичними хонами нової конструкції з різною зернистістю на параметри шорсткості зубчастих коліс  $R_{\max}$ ,  $R_q$  і  $R_z$ .

Як показують результати досліджень шорсткість бічних поверхонь шестерень до і після обробки алмазним хонінгуванням коливається в межах:

- по параметру  $R_{\max}$  вздовж профілю до обробки  $R_{\max}=1,3-4,3$  мкм, після обробки  $R_{\max}=1,1-3$  мкм; вздовж лінії зуба до обробки  $R_{\max}=0,5-2,2$  мкм, після обробки  $R_{\max}=0,5-1,3$  мкм;

- по параметру  $R_q$  вздовж профілю до обробки  $R_q=0,22-0,95$  після обробки  $R_q=0,15-0,55$ ; вздовж лінії зуба до обробки  $R_q=0,1-0,42$  мкм, після обробки  $R_q=0,08-0,2$  мкм;

- по параметру  $R_z$  вздовж профілю до обробки  $R_z=1,1-3,8$  мкм, після обробки  $R_z=0,8-2,5$  мкм, вздовж лінії зуба до обробки  $R_z=0,4-1,5$  після обробки  $R_z=0,3-1,1$ .

Таким чином можна зробити висновок, що параметри шорсткості  $R_{\max}$ ,  $R_q$  і  $R_z$  зубчастих коліс після обробки алмазними черв'ячними хонами зменшуються в 1,5-2 рази.

Цей спосіб зубохонінгування алмазними черв'ячними еластичними хонами циліндричних зубчастих коліс можна рекомендувати для впровадження на більшості машинобудівних підприємств України без значних витрат.

В подальших (при впровадженні) дослідженнях необхідно встановити вплив шорсткості на експлуатаційні показники конкретних зубчастих механізмів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технології формоутворення сучасних складнопрофільних деталей [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізацій «Технології виготовлення літальних апаратів», «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю.В. Петраков, С.В. Сохань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Електронні текстові данні (1 файл: 22,5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 379 с.

2. Сторчак М.Г. Синтез технических систем для отделочной обработки зубчатых колес: дис. докт. техн. наук. – Киев, 1994. – 466 с.
3. Гулида Э.Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес. – Львов: Вища школа, 1977. – 168 с.
4. Сухоруков Ю.Н., Евстигнеев Р.И. Инструменты для обработки зубчатых колес методом свободного обката. – Киев: Техника, 1983. – 120 с.
5. Калашников А.С., Моргунов Ю.А., Калашников П.А. Современные методы обработки зубчатых колёс. Издательский дом «Спектр», Москва, 2012, 238 с.
6. Производство зубчатых колес: справ. / С.Н. Калашников [и др.]; под общ. ред. Б.А. Тайца. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
7. Зубохонингование [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Режим доступа: <https://www.gleason.com/ru/products/machines/cylindrical/gear-honing>
8. Ряд оборудования [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Режим доступа: [www.kapp-niles.com](http://www.kapp-niles.com) > RU\_KAPP\_NILES\_product\_line
9. Зубообрабатывающие станки [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Режим доступа: <https://www.liebherr.com/ru/rus/продукты/зубообрабатывающие-станки-и-системы-автоматизации/зубообрабатывающие-станки/зубообрабатывающие-станки.html>
10. Gear honing [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Режим доступа: [www.daetwyler.com](http://www.daetwyler.com) > Prospekte
11. Machines [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Режим доступа: <https://www.samputensili.com/machines/?type=machines>
12. Hard machining [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Режим доступа: <https://www.koepfer.com/en/production/hard-machining/>
13. Кривошея А.В. Финишная обработка цилиндрических зубчатых колес алмазными эластичными червячными хонами / А. В. Кривошея, В. Е. Мельник, В. В. Возный, С. В. Рябченко, В.Н. Бычихин, Т.Е. Третьяк // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент - техника и технология его изготовления и применения. - 2016. - Вып. 19. - С. 444-450.
14. ДСТУ ISO 4287:2012. "Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури".
15. Тополянский П.А. Повышение стойкости прецизионных зубчатых колес. РИТМ. Металлообработка. Сварка. 2014, № 4. - С. 22-27.
16. ДСТУ 2413-94 "Основні норми взаємозамінності. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення".
17. Математическая статистика в технологии машиностроения. Солонин И.С. М., Машиностроение, 1972, стр. 216.

#### REFERENCES

1. Tekhnologi`yi formoutvorennya suchasnikh skladnoprofil`nikh detalej [Elektronnij resurs] (Technologies shaping today's complex profile parts): navch. posi`b. dlyastud. speczi`al`nosti` 131 «Prikladna mekhani`ka» speczi`ali`zaczi`j «Tekhnologi`yi vigotovlennya li`tal`nikh aparati`v», «Tekhnologi`y i mashinobuduvannya» / KPI` i`m. I`gorya Si`kors`kogo; ukklad.: Yu.V. Petrakov, S.V. Sokhan`, V.K. Frolov, V.M. Koren`kov. – Elektronni` tekstovi` danni` (I fajl: 22,5 Mbajt). – Kiyiv : KPI` i`m. I`goryaSi`kors`kogo, 2018. – 379 s.
2. Storchak M.G. Sintez tekhnicheskikh sistem dlya otdelochnoj obrabotki zubchaty`kh koles (Synthesis of technical systems for gear finishing): dis. dokt. tekhn. nauk. - Kiev, 1994. - 466 s.
3. Gulida E`N. Tekhnologiya otdelochny`kh operaczij zuboobrabotki czilindricheskikh koles (Technology of finishing operations of gear machining of cylindrical wheels). – L`vov: Vishhashkola, 1977. – 168 s.
4. Sukhorukov Yu.N., Evstigneev R.I. Instrumenty` dlya obrabotki zubchaty`kh koles metodom svobodnogo obkata (Tools for machining gears by the free running). – Kiev: Tekhnika, 1983. – 120 s.
5. Kalashnikov A.S., Morgunov Yu.A., Kalashnikov P.A. Sovremenny`e metody` obrabotki zubchaty`kh kolyos (Modern processing techniques gears). – Izdatel`skij dom «Spekt`, Moskva, 2012. – 238 s.

6. Proizvodstvo zubchaty`kh koles (Manufacturing the gears): sprav. / S.N. Kalashnikov [i dr.]; pod obshh.red. B.A. Tajca. – 3-e izd.,pererab. idop. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 464 s.
7. Zubkhoningovanie [Elektronnij resurs] (Gearhoning): [Veb-sajt]. – Rezhim dostupu: <https://www.gleason.com/ru/products/machines/cylindrical/gear-honing>
8. Ryad oborudovaniya [Elektronnij resurs] (Range of equipment): [Veb-sajt]. – Rezhim dostupu: [www.kapp-niles.com](http://www.kapp-niles.com) > RU\_KAPP\_NILES\_product\_line
9. Zuboobrabaty`vayushhie stanki [Elektronnijresurs] (Gear cutting machines): [Veb-sajt]. – Rezhimdostupu: <https://www.liebherr.com/ru/rus/produkty`/zuboobrabaty`vayushhie-stanki-i-sistemy`-avtomatizaczii/zuboobrabaty`vayushhie-stanki/zuboobrabaty`vayushhie-stanki.html>
10. Gear honing [Elektronnijresurs]: [Veb-sajt]. – Rezhim dostupu: [www.daetwyler.com](http://www.daetwyler.com) > Prospekte
11. Machines [Elektronnijresurs] : [Veb-sajt]. – Rezhim dostupu: <https://www.samputensili.com/machines/?type=machines>
12. Hard machining [Elektronnijresurs] : [Veb-sajt]. – Rezhim dostupu: <https://www.koepfer.com/en/production/hard-machining/>
13. Krivosheya A.V. Finishnaya obrabotka czilindricheskikh zubchaty`kh kolesalmazny`mi e`lastichny`mi chervyachny`mi khonami (Finishing of spur gears with elastic diamond worm gears) / A. V. Krivosheya, V. E. Mel`nik, V. V. Vozny`j, S. V. Ryabchenko, V. N. By`chikhin, T. E. Tret`yak // Porodorazrushayushhij i metalloobrabaty`vayushhij instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniya i primeneniya. – 2016. –Vy`p. 19. – S. 444-450.
14. DSTU ISO 4287:2012. "Tekhni`chni` vimogi do geometri`yivirobi`v (GPS). Strukturapoverkhni`.Profi`l`nijmetod.Termi`ni, viznachennya ponyat` i`parametri strukturi" (Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters).
15. Topolyanskij P.A. Pov`yshenie stojkosti precizionny`k hzubchaty`kh koles (Improving the durability of precision gears). – RITM. Metalloobrabotka. Sverka. 2014, №4.– S. 22-27.
16. DSTU 2413-94 "Osnovni` normivzayemozami`nnosti`. Shorstki`st` poverkhni`.Termi`ni ta viznachennya" (Basic norms of interchangeability. Surface roughness.Terms and Definitions).
17. Solonin I.S. Matematicheskaya statistika v tekhnologii mashinostroeniya (Mathematical statistics in mechanical engineering technology).– M., Mashinostroenie, 1972. – 216 s.

*Стаття надійшла 10.08.2020*

*Кривошея А.В., Пащенко Є.О., Мельник В.С., Шербина К.К.*

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ ЗУБОХОНІНГУВАННЯ АЛМАЗНИМИ ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ХОНАМИ НА ПАРАМЕТРИ ШОРСТКОСТІ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС**

У представленій статті більш детально розглянуто новий спосіб обробки – зубохонінгуванняциліндричних шестерень. Аналіз літературних джерел показує, що найбільш проблематичною технологічною операцією є фінішна обробка зубчастих коліс та, зокрема, хонінгування. Показана різниця між традиційним хонінгуванням циліндричних шестерень дисковим абразивним хоном та новим способом обробки алмазним черв'ячним зубчастим хоном. Головною перевагою цього способу є те, що він може бути реалізований на фрезерних верстатах. Запропоновано нові інструменти - алмазні черв'ячні зубчасті хони та технологія їх виготовлення. Наведено режими обробки циліндричних шестерень різними алмазними черв'ячними зубчастими хонами та описаний сам спосіб обробки. Зубчасті колеса, які оброблялись використовуються в гідравлічних насосах та гідромоторах. В якості критерію оцінки використовували параметри шорсткості  $R_{max}$  (найбільша висота нерівності профілю або відстань між лінією виступів і лінією западин),  $R_z$  (висота по 10 точках),  $R_q$  (середня квадратична шорсткість), які відповідають українському та європейському стандарту ДСТУ ISO 4287:2012. Як відомо, міцність, зносостійкість, довговічність та інші параметри залежать від шорсткості робочих поверхонь зубців зубчастих коліс. Шорсткість впливає на знос контактних поверхонь і шум під час роботи при роботі зубчастих коліс, а також на момент їх запуску. Поверхні, що оброблялись порівнювали до та після обробки. Криві розподілу були побудовані для візуалізації експериментальних даних. При використанні нового способу обробки показано виправлення дефектів попередніх методів обробки. На підставі результатів проведених

досліджень можна зробити висновок, що параметри шорсткості  $R_{max}$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  покращуються в середньому в 1,5-2 рази. Цей спосіб можна рекомендувати для чистої обробки циліндричних зубчастих коліс, оскільки він ефективний і не вимагає нового обладнання, замінивши традиційні способи хонінгування зубчастих коліс, його можливо реалізувати без значних витрат на більшість українських підприємств.

**Ключові слова:** шорсткість, зубчасті колеса, зубохонінгування, черв'ячний хон, фінішна обробка, надтверді матеріали.

*Krivoshaya A.V., Paschenko E.O., Melnyk V.Ye., Shcherbyna K.K.*

#### **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE PROCESS OF GEAR HONING BY DIAMOND WORM HONING TOOLS ON THE ROUGHNESS FACTOR OF GEAR WHEELS**

In the presented article, a new method of finishing is considered in more detail - gear honing of cylindrical gears. Analysis of literature sources shows that the most problematic technological operation is the finishing of gear wheels and gear honing in particular. The difference between the traditional honing of cylindrical gears with disc abrasive honing and the new method of processing with diamond worm honing is shown. The main advantage of this method is that it can be implemented on milling machines. New tools are proposed - diamond worm gears and the technology of their manufacture is described. The modes of processing cylindrical gears with various diamond worm gears are given and the processing method itself is described. The gear wheels that were processed are used in hydraulic pumps and in hydraulic motors. Roughness parameters  $R_{max}$  (total height of profile),  $R_z$  (irregularity height at 10 points),  $R_q$  (root mean square deviation of the assessed profile), which correspond to the Ukrainian and European DSTU ISO 4287 standard, were used as a criterion for assessing the quality of gear processing: 2012. As you know, the strength, wear resistance, durability and other parameters depend on the roughness of the working surfaces of the teeth of the gear wheels. Roughness affects the wear of contact surfaces and noise during operation when running in gears, as well as at the time of their starting. The surfaces were compared before and after treatment. Distribution curves were plotted to visualize the experimental data. When using the new processing method, the correction of defects of the previous processing methods is shown. Based on the results of the studies carried out, it can be concluded that the roughness parameters  $R_{max}$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  improve on average by 1.5-2 times. This method can be recommended for the finishing of cylindrical gears, as effective and not requiring new equipment, replacing the traditional methods of honing gears, which can be implemented without significant costs at most Ukrainian enterprises.

**Key words:** roughness, gears, teeth honing, honing tools, finishing, superhard materials.

*Кривошея А.В., Пащенко Е.А., Мельник В.Е., Щербина К.К.*

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ЗУБОХОНИНГОВАНИЯ АЛМАЗНЫМИ ЧЕРВЯЧНЫМИ ХОНАМ НА ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

Предложены новые инструменты. Проведена оценка величины шероховатости при зубохонинговании алмазными червячными хонами цилиндрических эвольвентных зубчатых колес. Проведено сравнение поверхностей до и после обработки.

**Ключевые слова:** шероховатость, зубчатые колеса, зубохонингование, хон, финишная обработка.

УДК 621.913:621:633

*Кривошея А.В., Пащенко Е.А., Мельник В.Е., Щербина К.К.* Дослідження впливу процесу зубохонінгування алмазними черв'ячними хонами на параметри шорсткості зубчастих коліс // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2021. – Вип. 106. – С. 296-311.

*Запропоновано нові інструменти. Проведена оцінка величини параметрів шорсткості при зубохонінгуванні алмазними черв'ячними хонами циліндричних евольвентних зубчастих коліс. Проведено порівняння поверхонь до та після обробки.*

Табл. 0. Іл. 19. Бібліогр. 17 назв.

UDC 621.913: 621: 633

*Krivoshaya A.V., Paschenko E.O., Melnyk V.Ye., Shcherbyna K.K. Investigation of the influence of the process of gear honing by diamond worm honing tools on the roughness factor of gear wheels // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-&-Technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2020. – Issue 106. – P. 296-311. – Ukr*

*New tools are offered. The value of roughness parameters during gear honing of diamond worm cones of cylindrical involute gears is carried out. The surfaces were compared before and after treatment.*

Tabl. 0. Fig. 19. Ref. 17.

УДК 621.913:621:633

*Кривошея А.В., Пащенко Е.А., Мельник В.Е., Щербина К.К. Исследование влияния процесса зубохонингования алмазными червячными хонам на параметры шероховатости зубчатых колес // Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2020. – Вып. 106. – С. 296-311. – Укр.*

*Предложены новые инструменты. Проведена оценка величины шероховатости при зубохонинговании алмазными червячными хонами цилиндрических эвольвентных зубчатых колес. Проведено сравнение поверхностей до и после обработки.*

Табл. 0. Ил. 19. Библиогр. 17 назв.

**Автор** (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу Формування прецизійних елементів складнопрофільних виробів Кривошея Анатолій Васильович

**Адреса робоча:** 04074 Україна, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

**Робочий тел.:** +38(044) 468-86-26.

**мобільний тел.:** +38(050) 822-55-58

**E-mail:** krivosheyatolja@ukr.net

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-8753-2178>

**Автор** (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач відділом Технології формування структурованих інструментальних композитів Пащенко Євген Олександрович

**Адреса робоча:** 04074 Україна, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

**Робочий тел.:** +38(044) 430-76-94.

**E-mail:** lab6\_1@ism.kiev.ua

**Автор** (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії криміналістичної та спеціальної техніки Мельник Володимир Євгенійович

**Адреса робоча:** 01011 Україна, м. Київ, вул. Євгена Гуцала, 4а, Державний науково-дослідний інститут МВС України

**Робочий тел.:** +38(093) 842-63-43.

**мобільний тел.:** +38(093) 842-63-43

**E-mail:** msm2@i.ua

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-9386-8620>

**Автор** (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Металорізальні верстати та системи» Щербина Кирил Костянтинович

**Адреса робоча:** 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8, Центральноукраїнський національний технічний університет

**Робочий тел.:** 099 47 63564

**мобільний тел.:** 099 47 63564

**E-mail:** kir2912s@ukr.net

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-1665-7686>