

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.87

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.37-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.37-47)

**В.О. Дзюра**, проф., д-р техн. наук, **П.О. Марушак**, проф., д-р техн. наук, **В.О. Семенен**, **В.В. Головка**, **В.Я. Федів**

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна*

*e-mail: volodymyrdzyura@gmail.com*

## Обґрунтування параметрів регулярних мікрорельєфів сформованих на плоских поверхнях

Розглянуто технологічні особливості формування регулярного мікрорельєфу I виду на плоских поверхнях методом вібраційного обкочування вібраційною головкою із кульковими обкатниками. Отримано аналітичну залежність для визначення шляху, що пройде віброобкатник за чверть оберту шпинделя при заданих режимах формування мікрорельєфу. Отримано аналітичні залежності для визначення відносної площі віброобкоченої поверхні для рельєфу з паралельними канавками, сформованого на плоских поверхнях. Встановлено умови формування мікрорельєфу в залежності від геометричних параметрів мікрорельєфу та технологічних режимів його формування. Побудовано графіки залежності відносної площі віброобкочування  $F_v$  від повздовжньої подачі інструменту,  $S_{пз}$  та від частоти  $n_{дв.х.}$  осциляцій обкатників, а також графіки відносної площі віброобкочування  $F_v$  від кроку канавки  $t_k$ . **плоскі поверхні, регулярний мікрорельєф, геометричні параметри, вібраційне обкочування, аналітичні залежності, умови формування**

**Постановка проблеми.** Підвищення зносостійкості та довговічності високонавантажених пар тертя є одним із основних завдань сучасного машинобудування.

Класичним підходом для забезпечення високої якості поверхні є зменшення її шорсткості і відносно коефіцієнта тертя спряжених поверхонь. Однак у випадку високих питомих тисків та високих робочих температур неминучим є поява адгезії між спряженими поверхнями, яка призводить до утворення поверхневих дефектів навіть при нетривалих перевантаженнях [1, 2]. Тому використання класичного підходу до забезпечення якості робочих поверхонь важконавантажених пар тертя є недоцільним.

Одним з основних наукових підходів підвищення зносостійкості поверхонь тертя є формування регулярного мікрорельєфу – сітки каналів невеликої глибини сформованої на поверхні робочих елементів деталей машин для забезпечення ряду суттєвих переваг [3,4]. Сучасне обладнання дозволяє формувати такі мікрорельєфи з високою точністю на фрезерних верстатах з числовим програмним керуванням. Однак вартість такого обладнання є досить високою, а час формування мікрорельєфу – довшим у порівнянні з вібраційними методами формування, які базуються на механічному коливному русі віброобкатника з певною амплітудою. Такий метод формування мікрорельєфу є більш продуктивнішим при формуванні мікрорельєфу простих форм, особливо на плоских поверхнях, що задовольняє умови масового виробництва не надто відповідальних поверхонь.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Встановлення основних закономірностей впливу рельєфних утворень на механізми тертя та зношування та оптимізація технології формування регулярного рельєфу поверхонь тертя активно

© В.О. Дзюра, П.О. Марущак, В.О. Семенен, В.В. Головка, В.Я. Федів, 2023

досліджуються за детермінованими та стохастичними підходами, а також прямими фізичними експериментами [5, 6]. Крім того, на даний час відомо значну кількість методів утворення регулярного рельєфу це й гаряче прокатування, штампування різних видів, лазерне текстування. Ці методи забезпечують утворення заданої геометрії текстур, проте мають певні недоліки, зокрема складність відтворення рельєфу складної форми, необхідність складного обладнання.

Згідно з [7] до регулярного мікрорельєфу II типу відносять мікрорельєф із системою канавок, які дотикаються. У випадку частково регулярного мікрорельєфу такі канавки можна поділити на три підвиди: канавки радіальна вісь яких співпадає, вісь яких зміщена на 0,5 кутового кроку та вісь яких зміщена на іншу величину.

Встановлення основних закономірностей впливу рельєфних утворень на механізми тертя та зношування та оптимізація технології формування регулярного рельєфу поверхонь тертя активно досліджуються за детермінованими та стохастичними підходами, а також прямими фізичними експериментами [8, 9].

Формування регулярного мікрорельєфу на робочих поверхнях деталей машин відчутно підвищує ресурс їх роботи за рахунок зниження ймовірності схоплювання деталей за умов рідинного та сухого тертя, більшої мастилоємності поверхонь тертя, меншого періоду припрацювання або його відсутність; меншого коефіцієнту тертя між спряженими деталями, а також вищої зносостійкості [10].

В роботі [11] було сформовано регулярні мікрорельєфи на зовнішніх циліндричних поверхнях зразків із сталей medium-carbon steel 1C45 and the low-carbon alloy steel 18CrMn4-4 яких було встановити вплив режимів оброблення на параметри якості поверхні. Важливим висновком є те, що авторами встановлений значний вплив амплітуди мікрорельєфу на параметр шорсткості поверхні  $R_a$ .

Згідно [3] відносна площа  $F_n$  регулярного мікрорельєфу (РМР) – це виражене у відсотках відношення площі  $F_{кан}$ , що займають регулярні нерівності до площі  $F$  поверхні деталі, яка обробляється.

В роботі [7] вказано, що відносна площа поверхні  $F_n$  – це параметр частково регулярного мікрорельєфу, який найбільш повно характеризує практично всі експлуатаційні властивості поверхні і в першу чергу фактичну площу контакту однієї поверхні

Отже відносна площа поверхні регулярного мікрорельєфу  $F_n$  – один з найважливіших його показників, який характеризує експлуатаційні властивості поверхні на якій він сформований. Оптимальне його значення коливається в межах 30-45% в залежності від умов експлуатації спряжених поверхонь [3, 7]. Важливість забезпечення значень відносної площі РМР на всій робочій поверхні є очевидною.

Аналогічні задачі для мікрорельєфів сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання були вирішені в роботі [12] для мікрорельєфу I типу з канавками із співвісними осями та в роботі [13] – для мікрорельєфу II типу з канавками із осями зміщеними на 0,5 кутового кроку, тобто тими що дотикаються вершинами.

Найкращими технічними рішеннями для формування регулярних мікрорельєфів різних типів є використання інструменту та обладнання, які наведені в роботах [14, 15, 16]. Як показують експериментальні дослідження такі технологічні комплекси дозволяють сформувати регулярні мікрорельєфи різної складної практично на будь-яких поверхнях. Програмне кутання дозволяє забезпечити високу геометричну точність сформованих канавок і, відповідно, забезпечити стабільну відносну площу мікрорельєфу.

**Постановка завдання.** Завданням статті є встановлення впливу технологічних параметрів процесу формування регулярного мікрорельєфу сформованого на плоских

поверхнях на відносну площу віброобкочування і, відповідно, експлуатаційні властивості цієї поверхні.

**Виклад основного матеріалу.** Основним технологічним параметром, що визначає якісні та експлуатаційні параметри оброблюваної поверхні (шорсткість, ступінь зміцнення, маслосмність, тощо) і забезпечується відповідними параметрами віброобкочування (поздовжня подача поверхні –  $S_{пзdn}$ ; частота осциляцій –  $n_{дв.х}$ ; амплітуда  $A = 2e_{кр}$ , де  $e_{кр}$  – ексцентриситет привідного кулачка; діаметр кульки-обкатника –  $d_k$ ; зусилля деформування –  $F_\delta$ ; ширина канавки –  $\rho$ ), відносна площа віброобкоченої поверхні  $F_\delta$  [1].

Під поняттям відносна площа  $F_\delta$  будемо розуміти відношення (у відсотках) площі поверхні, утвореної внаслідок деформування віброобкатником обробленої поверхні при віброобкочуванні до загальної площі оброблюваної поверхні.

Для визначення площі поверхні, що утворюється при використанні одного віброобкатника тобто площі канавки  $F_{kl}$  використаємо рис 1.

Крива переміщення кульки-обкатника  $L_{кр} = \varphi_1(\varphi_{кр})$  в залежності від часу являє собою синусоїдально-подібну криву з періодом  $2\pi$  та амплітудою  $A=2e_{кр}$  і описується залежністю:

$$L_{кр} = \sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун}} + e_{кр} (1 - \cos 2\tau\pi n_{ун}) - l; \quad (1)$$

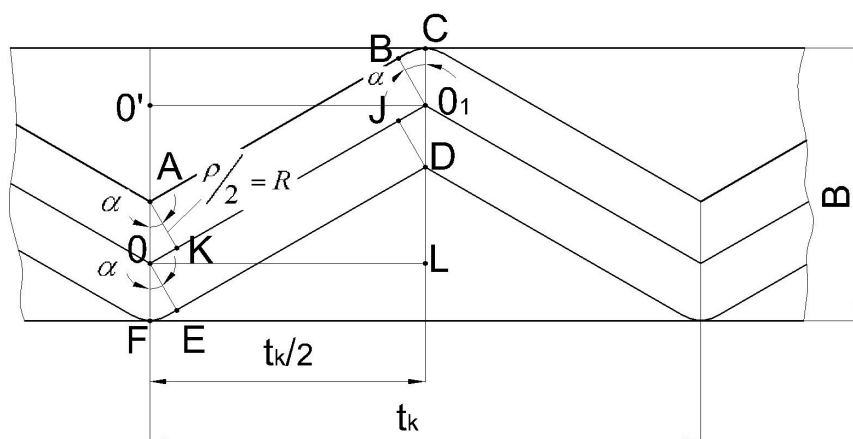


Рисунок 1 – Розрахункова схема для визначення площі віброобкочування на довжині, що дорівнює кроку  $t_k$

*Джерело розроблено авторами*

Швидкість руху кульки-обкатника  $V_k$  визначається за формулою:

$$\frac{dL}{d\tau} = V_{кр} = \left( (l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун})^{\frac{1}{2}} \right)' + (e_{кр} (1 - \cos 2\tau\pi n_{ун}))' - l'; \quad (2)$$

Отримаємо похідну з кожного доданку окремо:

$$1). \left( (l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун})^{\frac{1}{2}} \right)' = -\frac{\pi \cdot n_{ун} \cdot e_{кр}^2 \cdot \cos 2\tau\pi n_{ун}}{\sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун}}};$$

$$2). (e_{кр} (1 - \cos 2\tau\pi n_{ун}))' = 2e_{кр} \cdot \pi \cdot n_{ун} \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун};$$

3).  $l' = 0$ ;

Отже швидкість руху кульки-обкатника  $V_k$  запишеться у вигляді:

$$\frac{dL}{d\tau} = V_{kp} = 2e_{kp}\pi n_{шп} \cdot \sin 2\tau\pi n_{шп} - \frac{e_{kp}^2 \cdot n_{шп} \cdot \cos 2\tau\pi n_{шп}}{\sqrt{l^2 - e_{kp}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{шп}}}; \quad (3)$$

а графік залежності  $V_k$  від  $\varphi_{кр}$  поданий на рис. 1.

З метою спрощення розрахунків замінимо синусоїдально-подібну траєкторію віброобкатника  $L_{кр} = \varphi_1(\varphi_{кр})$ , що описується залежністю (1), на прямолінійну, яка представлена формулою  $L_{пр} = k \cdot \varphi_{кр}$  і залежністю  $L_{пр} = \varphi_2(\varphi_{кр})$  (рис. 2).

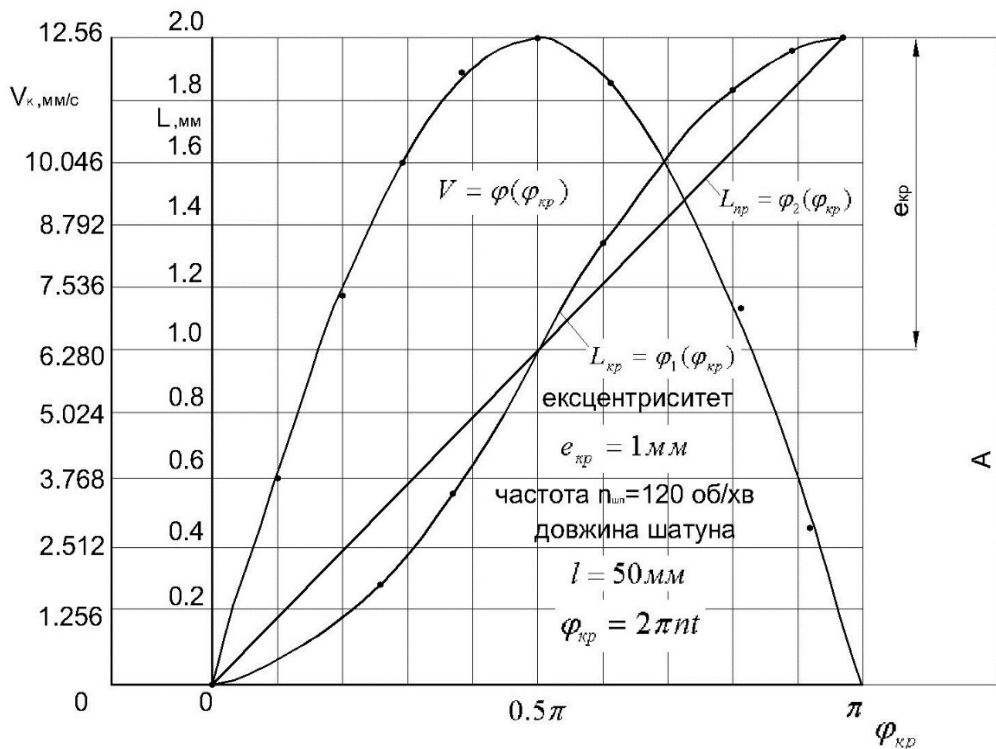


Рисунок 2 – Графік переміщення  $L$  і швидкості  $V_k$  віброобкатника в залежності від кута  $\varphi_{кр}$  повороту кривошипа  $l$  – довжина шатуна;  $n_{шп}$  – частота обертання шпинделя (частота осциляцій);  $\tau$  – час;  $2\tau\pi n_{шп} = \varphi_{кр}$  – кут повороту кривошипа

Джерело розроблено авторами

Така заміна повністю допустима і обґрунтовується нижчеподаним. Відносна похибка  $\delta_F$  при заміні площі, утвореної кулькою-обкатником, що здійснює синусоїдально-подібну траєкторію, на площу канавки, утвореної з прямолінійною траєкторією руху обкатника, не перевищує 5%. Величину  $\delta_F$  при постійній величині  $\rho$  можна визначити із залежності:

$$\delta_F = \frac{L'_{кр} - L'_{пр}}{L_{кр}} \cdot 100\% ; \quad (4)$$

де  $L'_{кр}$  і  $L'_{пр}$  – відповідно довжини кривої  $L_{кр} = \varphi_1(\varphi_{кр})$  і прямої  $L_{пр} = \varphi_2(\varphi_{кр})$  в інтервалі  $[0, \pi/2]$ . Якщо для випадку синусоїдально-подібної траєкторії швидкість руху

обкатника  $V_{кр}$  змінна (2) і рис. 1, то при прямолінійній траєкторії  $V_{пр}$  буде постійна і визначатиметься із залежності  $V_{пр} = 4e_{кр} \cdot n_{шп}$ .

Шлях, що пройде віброобкатник за чверть оберту шпинделя при заданих  $S_{позд}$ ,  $n_{шп}$  і  $V_{пр} = \text{const}$  визначиться залежністю:

$$L'_{пр}(\pi/2) = \sqrt{e_{кр}^2 + \frac{0,0625S_{позд}^2}{n_{шп}^2}} = \sqrt{e_{кр}^2 + 0,0625t_K^2}; \quad (5)$$

де  $t_K$  – крок канавки.

Шлях, що пройде віброобкатник за чверть оберту шпинделя при синусоїдально-подібній траєкторії в напрямку, перпендикулярному до  $S_{позд}$ , визначиться із формули:

$$\begin{aligned} L_{кр1} &= \int_0^{0,25n_{шп}} 2e_{кр} \cdot \pi \cdot n_{шп} \cdot \sin(2\pi \cdot n_{шп} \cdot \tau) d\tau - \int_0^{0,25n_{шп}} \frac{e_{кр}^2 \cdot \pi \cdot n_{шп} \cdot \cos(2\pi n_{шп} \cdot \tau)}{\sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\pi \cdot n_{шп} \cdot \tau}} d\tau = \\ &= 2e_{кр} \cdot \pi \cdot n_{шп} \int_0^{0,25n_{шп}} \sin(2\pi \cdot n_{шп} \cdot \tau) d\tau - e_{кр}^2 \cdot \pi \cdot n_{шп} \int_0^{0,25n_{шп}} \frac{\cos(2\pi \cdot n_{шп} \cdot \tau)}{\sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin(2\pi \cdot n_{шп} \cdot \tau)}} d\tau \end{aligned}$$

На основі розрахункової схеми (рис. 2) можна стверджувати, що на довжині, яка дорівнює половині кроку канавки  $t_K/2$ , площа канавки, утвореної в результаті віброобточування, буде дорівнювати подвоєній площі суми площ трапеції  $OABO_1$  і сектора  $O_1BC$ .

Розглянемо площу у трапеції  $OABO_1$ , як суму площ трикутника  $OAK$  і прямокутника  $KABO_1$ .

Для знаходження відрізка  $OO_1$  розглянемо  $\Delta OO_1L$  в якому  $O_1L = 2e_{кр}$ ,  $OL = t_K/2$ :

$$OO_1 = \sqrt{O_1L^2 + OL^2} = \sqrt{4 \cdot e_{кр}^2 + \frac{t_K^2}{4}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{t_K^2 + 16 \cdot e_{кр}^2}$$

Розглянемо  $\Delta OAK$ , його площа розраховується за формулою:

$$F_{\Delta OAK} = 1/2 \cdot AK \cdot OK, \text{ де } AK = \rho/2;$$

Оскільки  $\Delta OAK \square \Delta OO_1L$ , ( $\angle OAK = \angle O_1OL$ ,  $\angle OKA = \angle OLO_1 = 90^\circ$ )

$$\frac{OK}{O_1L} = \frac{AK}{OK}; \quad \frac{OK}{2 \cdot e_{кр}} = \frac{\rho/2}{t_K/2};$$

$$\text{звідси } OK = 2 \cdot e_{кр} \cdot \rho / t_K;$$

Отже

$$F_{\Delta OAK} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{2 \cdot e_{кр} \cdot \rho}{t_K} = \frac{\rho^2}{2} \cdot \frac{e_{кр}}{t_K};$$

Оскільки подвійну площу прямокутника  $KABO_1$  ( $KABO_1 = EOO_1D$ ) можна представити як різницю площі прямокутника з одною стороною рівною відрізку  $OO_1$ , а другою рівною ширині канавки ( $\rho = 2 \cdot AK = 2 \cdot R$ ) і подвоєній площі  $\Delta OAK$ .

Тоді знаходимо площу прямокутника з одною стороною рівною відрізку  $OO_1$ , а другою рівною ширині канавки ( $\rho = 2 \cdot AK = 2 \cdot R$ )

$$F_{\square} = OO_1 \cdot 2 \cdot AK = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{t_K^2 + 16 \cdot e_{кр}^2};$$

Отже

$$2 \cdot F_{KABO_1} = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{t_K^2 + 16 \cdot e_{кр}^2} - 2 \cdot \frac{\rho^2}{2} \cdot \frac{e_{кр}}{t_K};$$

А площа сектора круга  $O_1BC$  визначається за формулою:

$$F_{O_1BC} = \frac{\pi \cdot R^2}{360^\circ} \cdot \alpha, \text{ де } \angle \alpha = \arctg \frac{OK}{AK} = \arctg \frac{4 \cdot e_{кр}}{t_K};$$

Звідси

$$F_{O_1BC} = \frac{\pi \cdot R^2}{360^\circ} \cdot \alpha = \frac{\rho^2}{4} \cdot \frac{\pi \cdot \arctg \frac{4 \cdot e_{кр}}{t_K}}{360};$$

Знаходимо площу однієї канавки на довжині  $t_k/2$ :

$$\frac{F_{к1}}{2} = \frac{\rho}{2} \sqrt{t_K^2 + 16e_{кр}^2} - 2 \cdot \frac{\rho^2}{2} \cdot \frac{e_{кр}}{t_K} + 2 \cdot \frac{\rho^2}{4} \cdot \frac{\pi \cdot \arctg \frac{4e_{кр}}{t_K}}{360} = \frac{\rho}{2} \sqrt{t_K^2 + 16e_{кр}^2} + \frac{\rho^2}{4} \left( \frac{\pi \cdot \arctg \frac{4e_{кр}}{t_K}}{180} - \frac{4e_{кр}}{t_K} \right).$$

Після спрощення із врахуванням того, що крок канавки  $t_k = S_{нз\delta} / n_{об.х.}$ , площа однієї канавки на довжині кроку виразиться залежністю:

$$F_{к1} = \rho \sqrt{t_K^2 + 16e_{кр}^2} + \frac{\rho^2}{2} \left( \frac{\pi \cdot \arctg \frac{4e_{кр}}{t_K}}{180} - \frac{4e_{кр}}{t_K} \right). \quad (6)$$

Кут нахилу осі канавки до лінії, паралельної до напрямку поздовжньої подачі (кут сітки [1]) визначається за формулою:

$$\alpha = \arctg \frac{4e_{кр} \cdot n_{об.х.}}{S_{нз\delta}} \quad (7)$$

При проектуванні віброголовок кількість віброобкатників для утворення мікрорельєфу з паралельними канавками, що дотикаються (рис. 3), можна визначити із залежності:

$$i_0 = \frac{H_{от} - 2 \cdot e_{кр} - \rho + \left[ \rho / \cos \left( \arctg \frac{4e_{кр}}{t_K} \right) \right]}{\rho / \cos \left( \arctg \frac{4e_{кр}}{t_K} \right)} = \frac{H_{от} + \rho \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{4e_{кр} n_{об.х.}}{S_{нз\delta}} \right)^2} - 1 \right] - 2e_{кр}}{\rho \sqrt{1 + \left( \frac{4e_{кр} n_{об.х.}}{S_{нз\delta}} \right)^2}} \quad (8)$$

При заданих значеннях  $H_{вт}$  і попередньо визначених  $i_0$  для отримання рельєфу з паралельними канавками, що дотикаються (рис. 6), повинна виконуватись необхідна умова:

$$\rho = \frac{H_{вт} - 2e_{кр}}{1 + (i_0 - 1) \sqrt{1 + \frac{16e_{кр}^2}{t_k^2}}}; \quad (9)$$

де  $i_0$  – кількість віброобкатників.

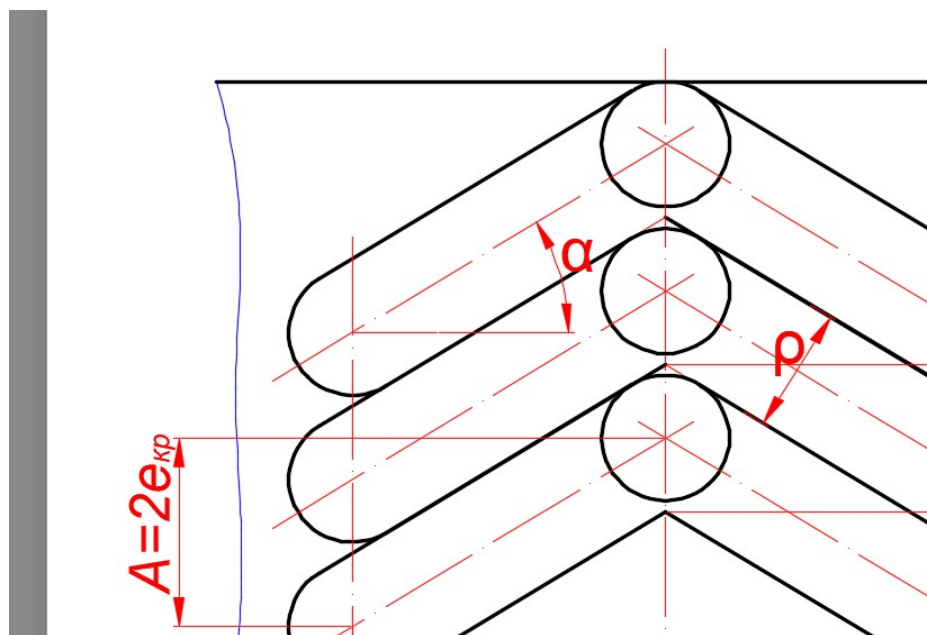


Рисунок 3 – Розрахункова схема для визначення ширини віброобробленої канавки  $\rho$   
Джерело розроблено авторами

Із рівняння (7) випливає, що при заданих  $H_{вт}$ ,  $t$  та  $i_0$  рельєф (рис. 3) може бути отриманий тільки при певних значеннях  $e_{кр}$  і  $\rho$ .

Розрахунок відносної площі поверхні з регулярним мікрорельєфом для II виду регулярного мікрорельєфу.

Відносна площа віброобробленої поверхні для рельєфу з паралельними канавками, що дотикаються (II вид мікрорельєфу), може бути визначена при використанні формули (8), підставивши у ній замість величини  $i_0$  величину  $i_1 = i_0 - n_0$ , де  $n_0 < i_0$  та  $n_0 = 1, 2, 3, \dots, i_0 - 1$ .

$$F_g = 100 \frac{\left( i_1 \cdot \left[ \rho \cdot \sqrt{\frac{S_{нозд}^2}{n_{ов.х.}^2} + 16e_{кр}^2} + \frac{\rho^2}{2} \left( \frac{\pi \arctg \frac{4e_{кр} n_{ов.х.}}{S_{нозд}}}{180} - \frac{4e_{кр} n_{ов.х.}}{S_{нозд}} \right) \right] \right)}{\frac{S_{нозд}}{n_{ов.х.}} \left\{ \rho \left[ 1 + (i_1 - 1) \sqrt{1 + \left( \frac{4e_{кр} n_{ов.х.}}{S_{нозд}} \right)^2} \right] + 2e_{кр} \right\}}; \quad (10)$$

Необхідна умова для отримання мікрорельєфу з паралельними канавками, що дотикаються, (II вид):

$$b_0 = \frac{H_{em} + \rho \sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}} (1 - i_0) - \rho - 2e_{kp}}{i_0 - 1} > 0,$$

де  $b_0$  – відстань між паралельними канавками;

Перевірка правильності формули

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{H_{em} + \rho \sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}} (1 - i_0) - \rho - 2e_{kp}}{i_0 - 1} = \frac{H_{em} + \frac{\rho}{\cos \alpha} (1 - i_0) - \rho - 2e_{kp}}{i_0 - 1} = \\ &= \frac{H_{em} + \frac{\rho}{\cos \alpha} - \frac{i_0 \cdot \rho}{\cos \alpha} - \rho - 2e_{kp}}{i_0 - 1}; \end{aligned}$$

Позначимо  $H_{em} + \frac{\rho}{\cos \alpha} - \rho - 2e_{kp}$  як  $\chi$  - сумарна товщина паралельних канавок, що дотикаються, на піку.

$$\text{Тоді} \quad \frac{\chi - \frac{i_0 \cdot \rho}{\cos \alpha}}{i_0 - 1} = \frac{\chi - i_0 \cdot \frac{\rho}{\cos \alpha}}{i_0 - 1};$$

де  $\frac{\rho}{\cos \alpha}$  - ширина канавки при вершині;

$i_0 - 1$  - кількість проміжків між  $i_0$  канавками.

Враховуючи те, що:

$$B = \frac{\rho}{\cos \alpha} + b_0; \quad \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}}}$$

Настроювальний розмір віброобкатників для формування регулярного мікрорельєфу I виду:

$$B = \rho \sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}} + \frac{H_{em} + \rho \left[ (1 - i_0) \sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}} - 1 \right] - 2e_{kp}}{i_0 - 1}$$

Отримані графічні (рис. 4 - 5) залежності показують характер залежності відносної площі віброобкочування від технологічних параметрів при різних значеннях конструктивних параметрів мікрорельєфу та технологічних параметрів процесу формування мікрорельєфу.



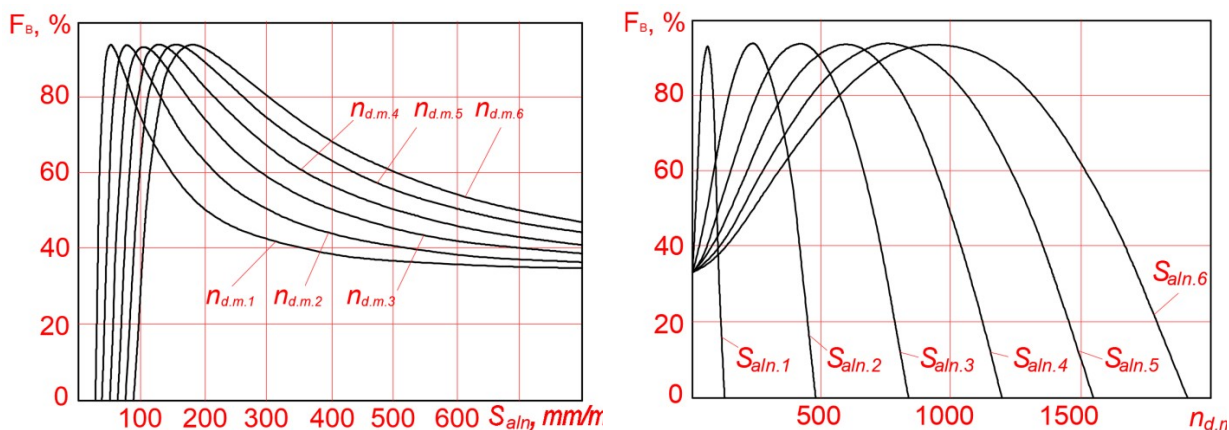


Рисунок 4 – Графіки залежності відносної площі регулярного мікрорельєфу  $F_r$  від: повздовжньої подачі інструменту,  $S_{n3}$  при заданих  $n_{d.m.}$ :  $n_{1d.m.}=60$  об/хв;  $n_{2d.m.}=90$  об/хв;  $n_{3d.m.}=120$  об/хв;  $n_{4d.m.}=150$  об/хв;  $n_{5d.m.}=180$  об/хв;  $n_{6d.m.}=210$  об/хв; від частоти  $n_{об.х.}$  осциляцій обкатників при заданих  $S_{n3}$ :  $S_{1n3}=50$  мм/хв;  $S_{2n3}=200$  мм/хв;  $S_{3n3}=350$  мм/хв;  $S_{4n3}=500$  мм/хв;  $S_{5n3}=650$  мм/хв;  $S_{6n3}=800$  мм/хв;

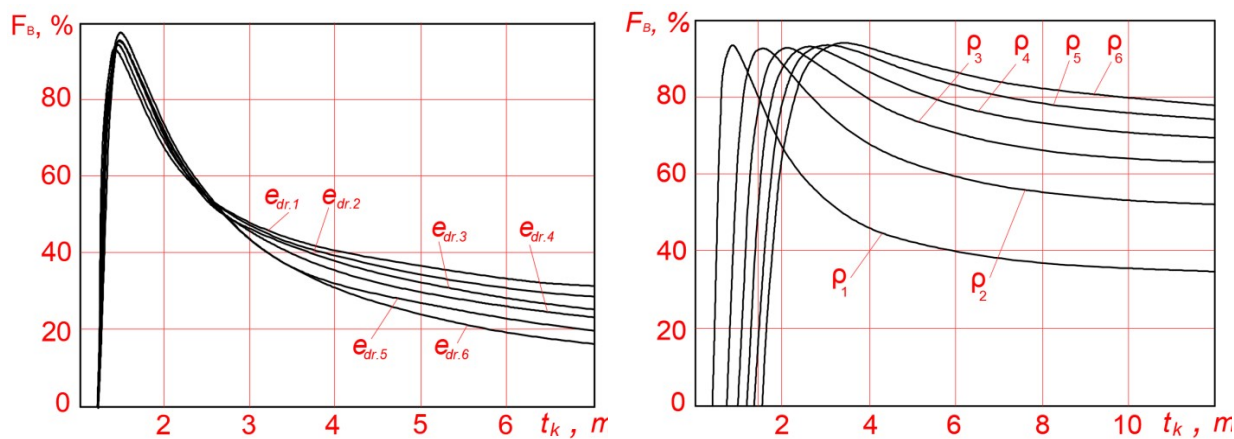


Рисунок 5 – Графіки залежності відносної площі регулярного мікрорельєфу  $F_r$  відкroku канавки  $t_k$

Джерело розроблено авторами

при заданих  $e_{кр}$ :  $e_{1кр}=1$  мм;  $e_{2кр}=3$  мм;  $e_{3кр}=6$  мм;  
 $e_{4кр}=9$  мм;  $e_{5кр}=12$  мм;  $e_{6кр}=15$  мм

при заданих  $\rho$ :  
 $\rho_1=1$  мм;  $\rho_2=2$  мм;  $\rho_3=3$  мм;  $\rho_4=4$  мм;  $\rho_5=5$  мм;  
 $\rho_6=6$  мм;

**Висновки.** Отримано аналітичні залежності для визначення відносної площі мікрорельєфу з паралельними канавками, які дотикаються (II тип), що сформований на плоскій поверхні в залежності від конструктивних параметрів канавки та режимів формування, що дозволить сформувати регулярний мікрорельєф із заданими геометричними параметрами і, відповідно, необхідними експлуатаційними властивостями.

## Список літератури

1. Tomanik E., El Mansori M., Souza R., Profito F. Effect of waviness and roughness on cylinder liner friction. *Tribology International*, 2018. 120. pp. 547-555.
2. Grützmacher, P.G.; Profito, F.J.; Rosenkranz, A. Multi-Scale Surface Texturing in Tribology—Current Knowledge and Future Perspectives. *Lubricants Lubricants*. 2019. 7(11), 95; <https://doi.org/10.3390/lubricants7110095>.
3. Surfaces with Regular Microshape. Classification, Parameters and Characteristics, GOST 24773-81 (Moscow: Izdatelstvo Standartov, 1988).
4. Mezghani, S.; Demirci, I.; Zahouani, H.; El Mansori, M. The effect of groove texture patterns on piston-

- ring pack friction. *Precis. Eng.* 2012, 36, 210–217.
5. Pawlus, P.; Reizer, R.; Wieczorowski, M. Reverse Problem in Surface Texture Analysis—One-Process Profile Modeling on the Basis of Measured Two-Process Profile after Machining or Wear. *Materials*. 2019. 12(24), 4169; <https://doi.org/10.3390/ma12244169>.
  6. Nanbu, T., Ren, N., Yasuda, Y. et al. Micro-Textures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion. *Tribol Lett* 29, 241–252 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11249-008-9302-9>
  7. Y. G. Schneider, Service Properties of Parts with Regular Microrelief, 2nd ed. (revised and augmented, in Russian) 253 (Leningrad: Mashinostroenie, 1982).
  8. P. Pawlus, R. Reizer, M. Wieczorowski, “Reverse problem in surface texture analysis—one-process profile modeling on the basis of measured two-process profile after machining or wear,” *Materials* 12(24), 4169 (2019); doi:10.3390/ma12244169.
  9. T. Nanbu, N. Ren, Y. Yasuda, et al., “Micro-textures in concentrated conformal-contact lubrication: effects of texture bottom shape and surface relative motion,” *Tribol. Lett.* 29, (2008): 241-252, doi:10.1007/s11249-008-9302-9.
  10. Aftanaziv, I.S.; Kyrychok P.O.; Melnychuk, P.P. Improving the reliability of machine parts by surface plastic deformation. Zhytomyr: ZhTI Publishing, 2001, 516 p.
  11. Nagit G., Slatineanu L., Dodun O., Ripanu M., Mihalache A. (2019). Surface layer microhardness and roughness after applying a vibroburnishing process. *Journal of Materials Research and Technology*. 8. 10.1016/j.jmrt.2019.07.044.
  12. Dzyura V., Maruschak P., Kozbur H., Kryvyi P., and Prentkovskis O., Determining optimal parameters of grooves of partially regular microrelief formed on end faces of rotary bodies. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, 2021, Vol. 5(1), P. 18-29, DOI:10.1520/SSMS20200057.
  13. Dzyura, V., Maruschak, P., Kuchvara I., Tkachenko I. Ensuring a stable relative area of burnishing of partially regular microrelief formed on end surfaces of rotary bodies. *Strojnický časopis-Journal of Mechanical Engineering*, 2021. VOL 71 (2021), NO 1, 41 – 50.
  14. S. Slavov, D. Dimitrov, I. Iliev. “Variability of regular relief cells formed on complex functional surfaces by simultaneous five-axis ball burnishing,” *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 2020, 82(3), pp. 195-206.
  15. S. Slavov, I. Iliev, Design and FEM static analysis of an instrument for surface plastic deformation of non-planar functional surfaces of machine parts, *Fiability & Durability*, ISSN 1844 – 640X, 2016, Nov 1(2).
  16. Dzyura, V., Maruschak, P., Slavov, S., Dimitrov, D., Vasileva, D. Experimental research of partial regular microreliefs formed on rotary body face surfaces. *Aviation*, 2021, 25(4), 268-277. <https://doi.org/10.3846/aviation.2021.15889>.

## References

1. Tomanik, E., El Mansori, M., Souza, R. & Profito, F. (2018). Effect of waviness and roughness on cylinder liner friction. *Tribology International*, 120, pp. 547-555 [in English].
2. Grützmacher, P.G., Profito, F.J. & Rosenkranz, A. (2019). Multi-Scale Surface Texturing in Tribology — *Current Knowledge and Future Perspectives*. 7(11), 95. <https://doi.org/10.3390/lubricants7110095> [in English].
3. Surfaces with Regular Microshape. Classification, Parameters and Characteristics (1988). *GOST 24773-81*. Moscow: Izdatelstvo Standartov [in English].
4. Mezghani, S., Demirci, I., Zahouani, H. & El Mansori, M. (2012). The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction. *Precis. Eng.* 36, 210–217 [in English].
5. Pawlus, P., Reizer, R. & Wieczorowski, M. (2019). Reverse Problem in Surface Texture Analysis—One-Process Profile Modeling on the Basis of Measured Two-Process Profile after Machining or Wear. *Materials*, 12(24), 4169; <https://doi.org/10.3390/ma12244169> [in English].
6. Nanbu, T., Ren, N., Yasuda, Y. et al. (2008). Micro-Textures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion. *Tribol Lett* 29, 241–252 <https://doi.org/10.1007/s11249-008-9302-9> [in English].
7. Schneider, Y.G. (1982). Service Properties of Parts with Regular Microrelief, 2nd ed. (revised and augmented, in Russian) 253. Leningrad: Mashinostroenie [in English].
8. Pawlus, P., Reizer, R. & Wieczorowski, M. (2019). Reverse problem in surface texture analysis—one-process profile modeling on the basis of measured two-process profile after machining or wear. *Materials*, 12(24), 4169doi:10.3390/ma12244169 [in English].
9. T. Nanbu, N. Ren, Y. Yasuda, et al., (2008). Micro-textures in concentrated conformal-contact

- lubrication: effects of texture bottom shape and surface relative motion. *Tribol. Lett.* 29, 241-252, doi:10.1007/s11249-008-9302-9 [in English].
10. Aftanaziv, I.S., Kyrychok P.O. & Melnychuk, P.P. (2001). Improving the reliability of machine parts by surface plastic deformation. Zhytomyr, ZhTI Publishing, 516 p. [in Ukrainian].
  11. Nagit, G., Slatineanu, L., Dodun, O., Ripanu, M. & Mihalache, A. (2019). Surface layer microhardness and roughness after applying a vibroburnishing process. *Journal of Materials Research and Technology*. 8. 10.1016/j.jmrt.2019.07.044 [in English].
  12. Dzyura, V., Maruschak, P., Kozbur, H., Kryvyi, P., & Prentkovskis, O., (2021). Determining optimal parameters of grooves of partially regular microrelief formed on end faces of rotary bodies. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems, Vol. 5(1)*, P. 18-29, DOI:10.1520/SSMS20200057 [in English].
  13. Dzyura, V., Maruschak, P., Kuchvara I. & Tkachenko I. (2021). Ensuring a stable relative area of burnishing of partially regular microrelief formed on end surfaces of rotary bodies. *Strojnický časopis- Journal of Mechanical Engineering, Vol. 71, No 1*, 41 – 50 [in English].
  14. Slavov, S., Dimitrov, D. & Iliev, I. (2020). Variability of regular relief cells formed on complex functional surfaces by simultaneous five-axis ball burnishing. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 82(3)*, pp. 195-206 [in English].
  15. Slavov, S. & Iliev, I. (2016). Design and FEM static analysis of an instrument for surface plastic deformation of non-planar functional surfaces of machine parts, *Fiability & Durability, ISSN 1844 – 640X, , Nov 1(2)* [in English].
  17. Dzyura, V., Maruschak, P., Slavov, S., Dimitrov, D. & Vasileva, D. (2021). Experimental research of partial regular microreliefs formed on rotary body face surfaces. *Aviation, 25(4)*, 268-277. <https://doi.org/10.3846/aviation.2021.15889> [in English].

**Volodymyr Dzyura**, Prof., DSc., **Petro Maruschak**, Prof., DSc., **Volodymyr Semehen**, **Volodymyr Holovko**, **Vasyl Fediv**

*Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine*

### **Justification of the Parameters of Regular Microreliefs Formed on Flat Surfaces**

The task of the article is to establish the influence of the technological parameters of the process of forming regular microrelief formed on flat surfaces on the relative area of vibration rolling and, accordingly, the operational properties of this surface.

The technological features of the formation of a regular microrelief of the 1st type on flat surfaces by the method of vibration rolling with a vibrating head with ball rollers are considered. An analytical dependence was obtained for determining the path that the vibratory run-in will take in a quarter of a spindle revolution under the given modes of microrelief formation. Analytical dependences were obtained for determining the relative area of the vibro-rolled surface for relief with parallel grooves formed on flat surfaces. The conditions for the formation of microrelief have been established, depending on the geometric parameters of the microrelief and the technological modes of its formation.

Graphs of the dependence of the relative area of vibration rolling  $F_B$  on the longitudinal feed of the tool,  $S_{ПЗ}$  and on the frequency  $ndv.x$ . oscillations of the rolling elements, as well as graphs of the relative area of vibration rolling  $F_B$  from the pitch of the groove  $t_k$ .

**flat surfaces, regular microrelief, geometric parameters, vibration rolling, analytical dependencies, forming conditions**

*Одержано (Received) 02.08.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 06.09.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023*