

ДЗЮРА ВОЛОДИМИР

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0002-1801-2419>e-mail: volodymyrdzyura@gmail.com

СЕМЕГЕН ВОЛОДИМИР

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0009-0003-7776-2062>e-mail: semegen5@gmail.com

РОЗРАХУНОК ВІДНОСНОЇ ПЛОЩІ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ

Проведено аналіз методів формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях деталей машин, а також методів визначення експлуатаційних властивостей поверхонь із сформованими регулярними мікрорельєфами із різними геометричними параметрами. За результатами аналізу встановлено, що експлуатаційні властивості поверхонь із сформованими площинними регулярними мікрорельєфами найкраще оцінює параметр - відносна площа мікрорельєфу, який фактично визначає експлуатаційні властивості такої поверхні. Оптимальне значення цього параметра залежить від конкретних умов експлуатації. Також на експлуатаційні властивості впливає вид мікрорельєфу, який визначається міжосьовою відстанню канавок регулярного мікрорельєфу. Розглянуто схеми формування частково регулярних мікрорельєфів з канавками, що не перетинаються (I вид), перетинаються (III вид) та повністю регулярного мікрорельєфу (IV вид). Отримано аналітичні залежності для визначення відносної площі регулярних та частково регулярних мікрорельєфів із різною міжосьовою відстанню канавок та врахуванням площі їх перекриття. Побудовані графічні залежності для визначення відносної площі регулярних мікрорельєфів в залежності від геометричних параметрів мікрорельєфу, швидкості подачі інструменту та кількості подвійних ходів, як найбільш впливових параметрів на відносну площу мікрорельєфу. Встановлено, що на зміну відносної площі мікрорельєфу в більшій мірі впливає зміна технологічних режимів формування мікрорельєфу - швидкості подачі та кількості подвійних ходів і в меншій мірі геометричні параметри мікрорельєфу - амплітуда та крок.

Ключові слова: регулярний мікрорельєф, поверхня, площа перекриття, параметри, режими формування, канавки, відносна площа.

DZYURA VOLODYMYR, SEMEGHEN VOLODYMYR

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

CALCULATION OF THE RELATIVE AREA OF REGULAR MICRORELIEFS

An analysis of the methods of forming regular micro reliefs on the flat surfaces of machine parts and methods of determining the operational properties of surfaces with formed regular micro reliefs with different geometric parameters was carried out. According to the analysis results, it was established that the operational properties of surfaces with formed planar regular micro reliefs are best evaluated by the parameter - the relative area of the micro relief, which determines the operational properties of such surfaces. The optimal value of this parameter depends on specific operating conditions. Also, the operational properties are affected by the type of micro relief, which is determined by the interaxial distance of the grooves of the regular micro relief. Schemes of formation of partially regular micro reliefs with non-intersecting grooves (I type), intersecting (III type) and fully regular micro reliefs (IV type) are considered. Analytical dependences were obtained to determine the relative area of regular and partially regular micro reliefs with different interaxial distances of the grooves and consider the area of their overlap. Graphical dependences were constructed to determine the relative area of regular micro reliefs depending on the geometrical parameters of the micro relief, tool feed speed, and the number of double moves, as the most influential parameters on the relative area of the micro relief. It was established that the change in the relative area of the micro relief is influenced to a greater extent by the change in the technological modes of the formation of the micro relief - feed speed and the number of double strokes, and to a lesser extent by the geometric parameters of the micro relief - amplitude and step.

Keywords: regular micro relief, surface, overlapping area, parameters, modes of formation, grooves, relative area.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Постійно зростаючі вимоги до збільшення ресурсу вузлів та агрегатів вимагають збільшення вимог до якості та експлуатаційних властивостей робочих поверхонь відповідальних деталей. Підвищення зносостійкості та довговічності високонавантажених пар тертя є одним із основних завдань сучасного машинобудування.

Традиційний метод покращення якості поверхні полягає в зменшенні її шорсткості, яка регламентується відповідними стандартами [1-4], та в зниженні коефіцієнта тертя між контактуючими поверхнями. Проте при високих питомих тисках і робочих температурах неминує виникнення адгезії між спряженими поверхнями, що призводить до появи дефектів навіть при короткочасних перевантаженнях [5, 6]. Таким чином, класичний підхід не є ефективним для забезпечення якості робочих поверхонь у важконавантажених вузлах тертя.

Одним із сучасних наукових підходів до підвищення зносостійкості поверхонь тертя є створення регулярного мікрорельєфу – сітки неглибоких каналів на робочих поверхнях деталей машин, що надає ряд суттєвих переваг [7, 8, 9]. Сучасне обладнання дозволяє з високою точністю формувати такі мікрорельєфи на фрезерних верстатах з числовим програмним керуванням. Проте, це обладнання є дорогим, а процес формування мікрорельєфу займає більше часу порівняно з вібраційними методами, що базуються на

механічному коливальному русі віброобкатника з певною амплітудою. Ці методи є більш ефективними для створення мікрорельєфу простих форм, особливо на плоских поверхнях, що відповідає умовам масового виробництва менш критичних поверхонь.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідженню експлуатаційних властивостей поверхонь із сформованими поверхневими регулярними мікроструктурами присвячено значна кількість наукових праць. В роботі [10], встановлено, що методи обробки із формуванням на поверхні металу поверхневих впорядкованих мікроструктур збільшують корозійну стійкість та покращують структуру поверхні оброблюваного матеріалу. Дослідним зразком при цьому була плоска металева поверхні із матеріалу Mg Alloy AZ31.

Значно кращі експлуатаційні властивості обробленої поверхні забезпечує вібраційна обробка. Такий вид оброблення забезпечує формування на обробленій поверхні сітки канавок – регулярного мікрорельєфу. Позитивний вплив регуляризації поверхні на її експлуатаційні властивості описаний зокрема в роботі [11], де авторами встановлено, що нанесення регулярних мікрорельєфів зменшує коефіцієнт тертя спряжених поверхонь пари тертя. Крім цього в цій роботі були закладені основи класифікації регулярних мікрорельєфів та наведено конструкції інструментів для їх формування. До регулярного мікрорельєфу II виду 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. Згідно [7] відносна площа F_e регулярного мікрорельєфу (РМР) – це виражене у відсотках відношення площі $F_{кан}$, що займають регулярні нерівності до площі F поверхні деталі, яка обробляється. Відносна площа F_e поверхні – це параметр частково регулярного мікрорельєфу, який найбільш повно характеризує практично всі експлуатаційні властивості поверхні і, в першу чергу, фактичну площу контакту між спряженими деталями. Отже відносна площа F_e поверхні регулярного мікрорельєфу – один з найважливіших його показників, який характеризує експлуатаційні властивості поверхні, на якій він сформований. Її оптимальне значення коливається в межах 30-45 % в залежності від умов експлуатації спряжених поверхонь.

Створення регулярних мікрорельєфів безвібраційним способом можливо реалізувати на фрезерних верстатах з числовим програмним керуванням. Таку реалізацію наведено в роботі [12] з визначення впливу режимів оброблення на геометричні параметри елементів мікрорельєфу сформованих на різних типах поверхонь: плоскій, циліндричній та фасонній. При цьому використовували фрезерний верстат з ЧПК HAAS VF-4, обладнаний двовісним поворотним столом HAAS TR-110 і спеціально спроектованою кульковим деформувальним інструментом.

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 [13, 14]. Крім того, на даний час відомо значну кількість методів утворення регулярного рельєфу це й гаряче прокатування, штампування різних видів, лазерне текстурування. Ці методи забезпечують утворення заданої геометрії текстур, проте мають певні недоліки, зокрема складність відтворення рельєфу складної форми, необхідність у складному обладнанні.

Закономірності процесів формування регулярних мікрорельєфів та їх позитивний вплив на зміну експлуатаційних властивостей також описані в роботах [15, 16].

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 маслоємності поверхонь тертя, меншого періоду припрацювання або його відсутність; меншого коефіцієнту тертя між спряженими деталями, а також вищої зносостійкості [17].

В роботі [18] було сформовано регулярні мікрорельєфи на зовнішніх циліндричних поверхнях зразків із сталей 1С45 та 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 .

Відносна площа поверхні регулярного мікрорельєфу (F_n) є одним з ключових показників, що визначає експлуатаційні характеристики поверхні. Оптимальне значення цього показника варіюється в межах 30-45% залежно від умов експлуатації спряжених поверхонь [3, 11]. Забезпечення таких значень відносної площі регулярного мікрорельєфу на всій робочій поверхні є надзвичайно важливим. Аналогічні задачі для мікрорельєфів сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання були вирішені в роботі [19] для мікрорельєфу I виду з канавками із співвісними осями та в роботі [20] – для мікрорельєфу II виду з канавками із осями зміщеними на 0,5 кутового кроку, тобто тими що дотикаються вершинами.

Найкращими технічними рішеннями для формування регулярних мікрорельєфів різних видів є використання інструменту та обладнання, які наведені в роботах [12, 21, 22]. 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.

У дослідженні [23] було вивчено вплив розташування регулярних мікронерівностей трикутної форми на коефіцієнт тертя між торцевими поверхнями тіл обертання як з використанням мастила L-AN-46,

так і без нього. Експерименти проводилися при притискній силі 20 Н та відносній швидкості переміщення 0,4 м/с. Автори виявили, що розташування елементів мікрорельєфу суттєво впливає на значення коефіцієнта тертя. Найнижчий коефіцієнт тертя спостерігався при взаємодії торцевих поверхонь з мікрорельєфом, який мав центральний кут мікронерівностей 90° з орієнтацією до зовнішніх сторін торцевої поверхні.

Формулювання цілей статті

Тому метою даної статті є отримання аналітичних залежностей для визначення відносної площі регулярних та частково регулярних мікрорельєфів із різною міжосьовою відстанню канавок та врахуванням площі їх перекриття, а також графічних залежностей для визначення відносної площі регулярних мікрорельєфів в залежності від геометричних параметрів мікрорельєфу, швидкості подачі інструменту та кількості подвійних ходів, як найбільш впливових параметрів на відносну площу мікрорельєфу.

Виклад основного матеріалу

Оскільки відносна площі мікрорельєфу є визначальним параметром, що визначає експлуатаційні властивості поверхні, то визначимо відносну площу регулярних мікрорельєфів сформованих на плоских поверхнях у відповідності до [7]. Розглянемо випадки формування мікрорельєфу з канавками, що перетинаються та міжосьовою відстанню різної величини. Визначення відносної площі віброобкочування для мікрорельєфу з паралельними канавками, що дотикаються проведено в роботі [24].

При визначенні відносних площ для мікрорельєфів, що перетинаються (рис. 1) необхідно врахувати площу перекриття та відповідну кількість таких перетинів. Для цього розглянемо розрахункову схему регулярного мікрорельєфу, канавки якого розміщені. Прийняті умовні позначення A_k – амплітуда, t_k – крок канавки, b_k – ширина канавки.

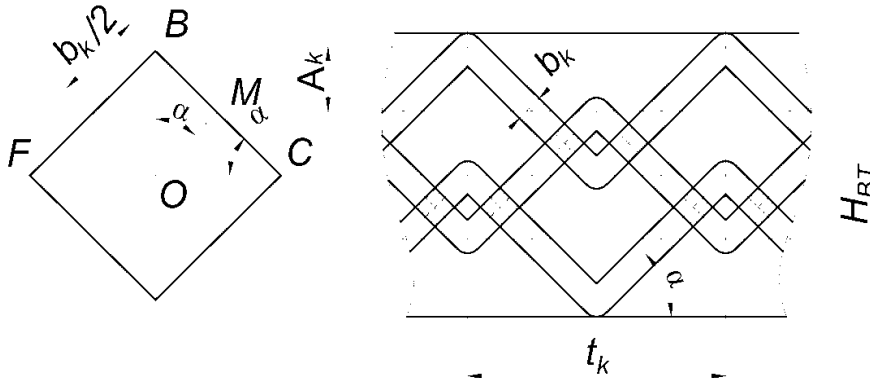


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення площі перекриття канавок мікрорельєфу

На основі розрахункової схеми, поданої на рис. 1, визначаємо площу перекриття F_{nep} :

На розрахунковій схемі розглянемо $\triangle OMB$ ($\angle OMB=90^\circ$), його сторона $MO = b_k/2$.

Звідси знаходимо сторону BM , яка дорівнює

$$BM = \frac{b_k}{2} \cdot \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right) = \frac{4 \cdot A_{kp} \cdot b_k}{2 \cdot t_k} \tag{1}$$

Розглянемо $\triangle OMC$ ($\angle OMC=90^\circ$), його сторона $MO = b_k/2$;

Знаходимо довжину сторони MC із залежності

$$MC = \frac{b_k}{2} \cdot \operatorname{ctg} \alpha_k = \frac{b_k}{2 \cdot \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right)} = \frac{b_k \cdot t_k}{8 \cdot A_{kp}} \tag{2}$$

Визначимо довжину сторони BC

$$BC = BM + MC = \frac{b_k}{2} \cdot \left(\frac{16 \cdot A_{kp}^2 + t_k^2}{4 \cdot t_k \cdot A_{kp}} \right) \tag{3}$$

Також цю величину можна знайти із виразу

$$BC = BM + MC = \frac{b_k}{2} \cdot \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right) + \frac{b_k}{2} \cdot \operatorname{ctg} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right) = \frac{b_k}{\sin \left(2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right)} \tag{4}$$

Оскільки фігура зі сторонами FB і BC – ромб, то його площа визначається із залежності

$$F_{nep} = FB \cdot BC \cdot \sin(\angle FBC) = \left(\frac{b_k}{\sin \left(2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right)} \right)^2 \cdot \sin \left(180^\circ - 2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right)$$

Після спрощення цього виразу отримаємо залежність

$$F_{nep} = \frac{b_k^2}{\sin \left(2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right)} \tag{5}$$

Для визначення складових формули (5) визначимо $\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right)$.

Розглянуто ΔO_1LO у якому $\angle O_1OL=90^\circ$ (рис. 1) та записано вирази для визначення $\sin\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k}\right)\right)$ та $\cos\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k}\right)\right)$.

$$\sin\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k}\right)\right) = \frac{O_1L}{O_1O} = \frac{4 \cdot A_{kp}}{\sqrt{t_k^2 + 16 \cdot A_{kp}^2}} \quad (6)$$

$$\cos\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k}\right)\right) = \frac{OL}{O_1O} = \frac{t_k}{\sqrt{t_k^2 + 16 \cdot A_{kp}^2}} \quad (7)$$

Тоді формула для визначення однієї площі перекриття двох канавок матиме вигляд:

$$F_{пер} = \frac{b_k^2 \cdot (t_k^2 + 16 \cdot A_{kp}^2)}{8 \cdot A_{kp} \cdot t_k} \quad (8)$$

Кількість перекриттів для мікрорельєфу з канавками, що перетинаються, визначиться за формулою:

$$k_n = 2i_0 - 2;$$

де i_0 – кількість канавок мікрорельєфу, од.

Тоді відносна площа для III виду регулярного мікрорельєфу (з канавками, що перетинаються) визначається за формулою:

$$F_g = 100 \cdot \frac{i_0 \left(b_k \sqrt{\frac{S_{пз}^2}{n_{дв.х.}^2} + 16 \cdot A_k^2} + \frac{b_k^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \arctg\left(\frac{4 \cdot A_k \cdot n_{дв.х.}}{S_{пз}}\right) \cdot 4 \cdot A_k \cdot n_{дв.х.}}{180} - \frac{4 \cdot A_k \cdot n_{дв.х.}}{S_{пз}} \right) - (2 \cdot i_0 - 2) \cdot \frac{b^2 (S_{пз}^2 + 16 \cdot A_k^2 \cdot n_{дв.х.}^2)}{8 \cdot A_k \cdot n_{дв.х.} \cdot S_{пз}} \right)}{S_{пз} \cdot (0,5(i_0 + 1)(2 \cdot A_{kp} + 0,5 \cdot b_k))} \quad (9)$$

Отримана залежність дозволяє оцінити вплив геометричних та технологічних параметрів процесу формування на зміну відносної площі регулярного мікрорельєфу. Для цього побудовані графіки залежності (рис. 2 – рис. 5).

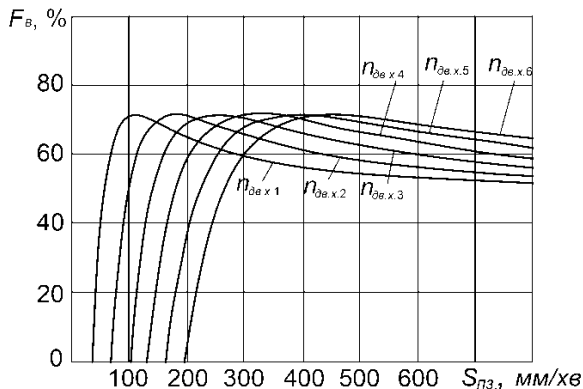


Рис. 2. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_g від повздовжньої подачі інструменту, $S_{пз}$ при заданих $n_{дв.х.}$: $n_{дв.х.1}=60$ об/хв; $n_{дв.х.2}=90$ об/хв; $n_{дв.х.3}=120$ об/хв; $n_{дв.х.4}=150$ об/хв; $n_{дв.х.5}=180$ об/хв; $n_{дв.х.6}=210$ об/хв

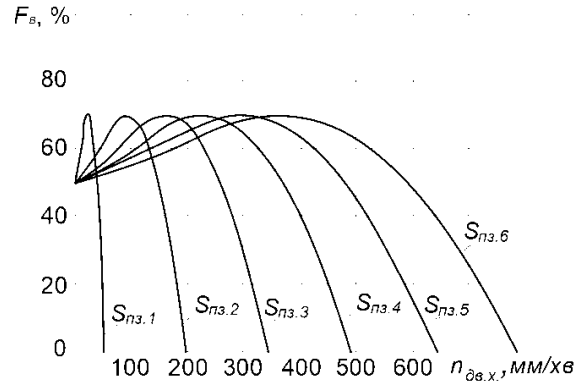


Рис. 3. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_g від частоти $n_{дв.х.}$ оциляцій обкатників при заданих $S_{пз}$: $S_{пз.1}=50$ мм/хв; $S_{пз.2}=200$ мм/хв; $S_{пз.3}=350$ мм/хв; $S_{пз.4}=500$ мм/хв; $S_{пз.5}=650$ мм/хв; $S_{пз.6}=800$ мм/хв

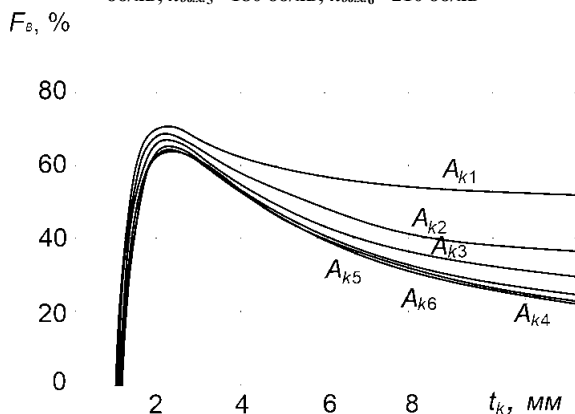


Рис. 4. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_g від кроку канавки t_k при заданих A_k : $A_{k1}=1$ мм; $A_{k2}=3$ мм; $A_{k3}=6$ мм; $A_{k4}=9$ мм; $A_{k5}=12$ мм; $A_{k6}=15$ мм

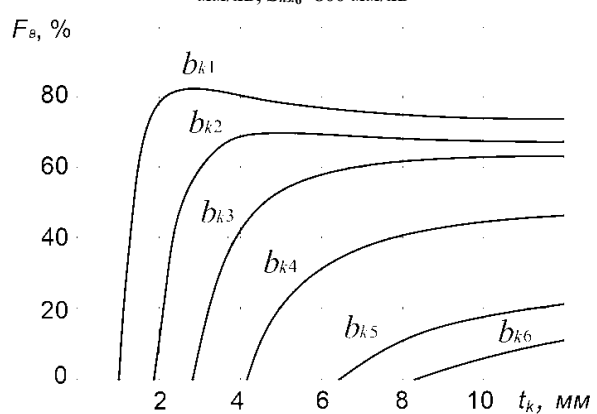


Рис. 5. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_g від кроку канавки t_k при заданих b_k : $b_{k1}=1$ мм; $b_{k2}=2$ мм; $b_{k3}=3$ мм; $b_{k4}=4$ мм; $b_{k5}=5$ мм; $b_{k6}=6$ мм

Використавши формулу (9) проведемо аналогічний розрахунок для визначення відносної площі віброобкоченої поверхні для регулярного мікрорельєфу з канавками, що не перетинаються. Для цього будемо враховувати лише площі канавок без врахування площі їх перекриття.

Формула для визначення відносної площі мікрорельєфу матиме вигляд:

$$F_g = 100 \cdot \frac{b_k \sqrt{\frac{S_{пз}^2}{n_{дв.х.}^2} + 16 \cdot A_k^2} + \frac{b_k^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \arctg\left(\frac{4 \cdot A_k \cdot n_{дв.х.}}{S_{пз}}\right) \cdot 4 \cdot A_k \cdot n_{дв.х.}}{180} - \frac{4 \cdot A_k \cdot n_{дв.х.}}{S_{пз}} \right)}{S_{пз} \cdot (2 \cdot A_{kp} + b_k)} \quad (10)$$

Отримана залежність дозволяє оцінити вплив геометричних та технологічних параметрів процесу формування на зміну відносної площі регулярного мікрорельєфу. Для цього побудовані графіки залежності (рис. 6 – рис. 9).

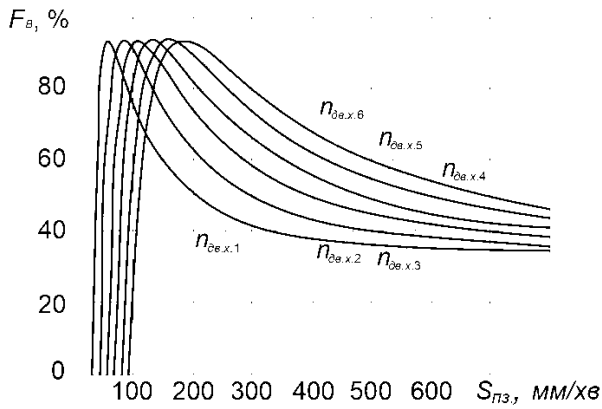


Рис. 6. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_r від повздовжньої подачі інструменту $S_{пз}$ при заданих $n_{об.х.}$: $n_{об.х.1}=60$ об/хв; $n_{об.х.2}=90$ об/хв; $n_{об.х.3}=120$ об/хв; $n_{об.х.4}=150$ об/хв; $n_{об.х.5}=180$ об/хв; $n_{об.х.6}=210$ об/хв

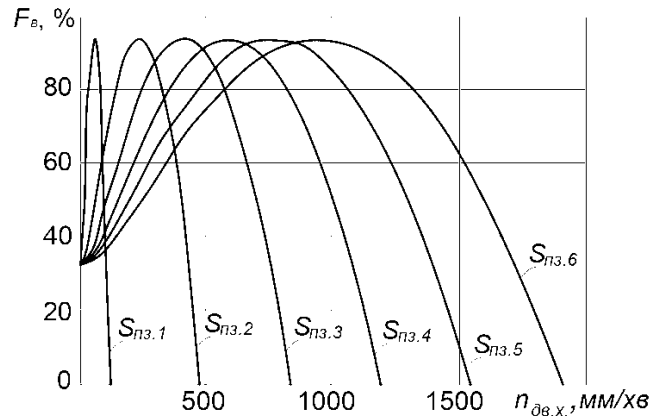


Рис. 7. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_r від частоти $n_{об.х.}$ осциляцій обкатників при заданих $S_{пз}$: $S_{пз1}=50$ мм/хв; $S_{пз2}=200$ мм/хв; $S_{пз3}=350$ мм/хв; $S_{пз4}=500$ мм/хв; $S_{пз5}=650$ мм/хв; $S_{пз6}=800$ мм/хв

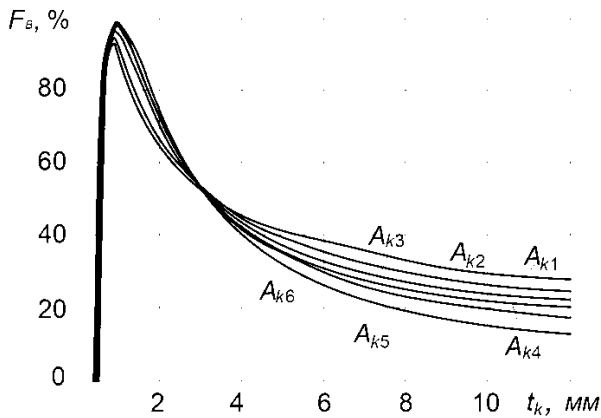


Рис. 8. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_r від кроку канавки t_k при заданих A_k : $A_{k1}=1$ мм; $A_{k2}=3$ мм; $A_{k3}=6$ мм; $A_{k4}=9$ мм; $A_{k5}=12$ мм; $A_{k6}=15$ мм

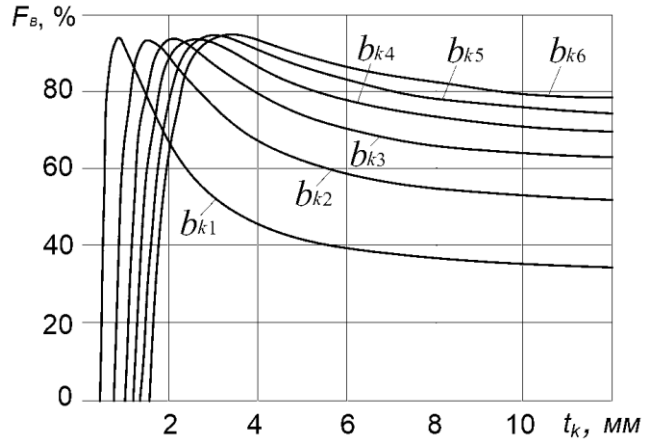


Рис. 9. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_r від кроку канавки t_k при заданих b_k : $b_{k1}=1$ мм; $b_{k2}=2$ мм; $b_{k3}=3$ мм; $b_{k4}=4$ мм; $b_{k5}=5$ мм; $b_{k6}=6$ мм

Проведено розрахунок відносної площі мікрорельєфу для повністю регулярного мікрорельєфу (IV вид РМР).

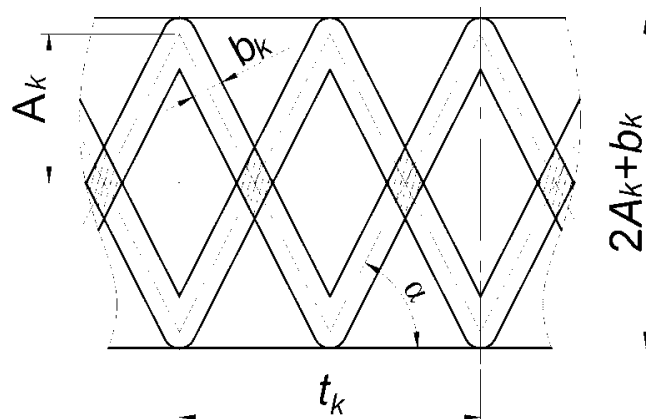


Рис. 10. Розрахункова схема для визначення площі та кількості перекриттів канавок повністю регулярного мікрорельєфу

При визначенні відносних площ для рельєфів, що перетинаються необхідно врахувати площу перекриття та відповідну кількість таких елементів. Кількість таких елементів для повністю регулярного мікрорельєфу, визначиться за формулою:

$$k_n = i_0(i_0 - 1) \tag{11}$$

З рис. 10 визначаємо tga . Розглянемо прямокутний трикутник, з кутом рівним $\alpha = \arctg(4A_k/t_k)$, в якому протилежний до цього кута катет рівний $2 \cdot A_k$, а прилеглий $t_k/2$. Тоді tga :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \cdot A_k}{t_k / 2} = \frac{4 \cdot A_k \cdot n_{\text{об.х.}}}{S_{\text{пз.}}} \quad (12)$$

Крок мікрорельєфу можна визначити із залежності

$$BC = \frac{b_k}{\sin \left(2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k} \right) \right)} = \frac{b_k}{2 \cdot \cos \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k} \right) \right) \cdot \sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k} \right) \right)}$$

Розглянемо $\triangle OBC$ ($\angle BOC=90^\circ$)

$$OC = BC \cdot \cos \alpha = \frac{b_k}{2 \cdot \cos \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k} \right) \right) \cdot \sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k} \right) \right)} \cdot \cos \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k} \right) \right) = \frac{b_k}{2 \cdot \sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k} \right) \right)}$$

Таким чином вираз для визначення площі перекриття матиме вигляд:

$$F_{\text{пер}} = \frac{b_k^2}{2 \cdot \sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{\text{кр}}}{t_k} \right) \right)} \quad (13)$$

Відносну площу мікрорельєфу з врахуванням (13) визначають із залежності

$$F_g = 100 \cdot \frac{i_0 \left(b_k \sqrt{\frac{S_{\text{пз.}}^2}{n_{\text{об.х.}}^2} + 16 \cdot A_k^2} + \frac{b_k^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_k \cdot n_{\text{об.х.}}}{S_{\text{пз.}}} \right)}{180} - \frac{4 \cdot A_k \cdot n_{\text{об.х.}}}{S_{\text{пз.}}} \right) - i_0(i_0 - 1) \frac{b_k^2}{2 \cdot \sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{\text{кр}}}{t_k} \right) \right)} \right)}{\frac{S_{\text{пз.}}}{n_{\text{об.х.}}} \cdot (0,5(i_0 + 1)(2 \cdot A_{\text{кр}} + 0,5 \cdot b_k))} \quad (14)$$

Отримана залежність дозволяє оцінити вплив геометричних та технологічних параметрів процесу формування на зміну відносної площі регулярного мікрорельєфу. Для цього побудовані графіки залежності (рис. 11 – рис. 14).

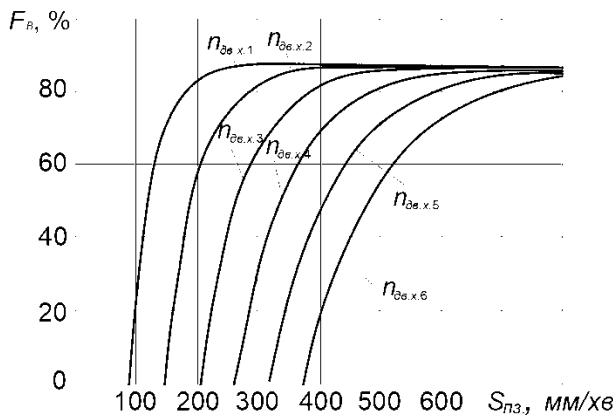


Рис. 11. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_g від повздовжньої подачі інструменту, $S_{\text{пз}}$ при заданих $n_{\text{об.х.}}$: $n_{\text{об.х.1}}=60$ об/хв; $n_{\text{об.х.2}}=90$ об/хв; $n_{\text{об.х.3}}=120$ об/хв; $n_{\text{об.х.4}}=150$ об/хв; $n_{\text{об.х.5}}=180$ об/хв; $n_{\text{об.х.6}}=210$ об/хв

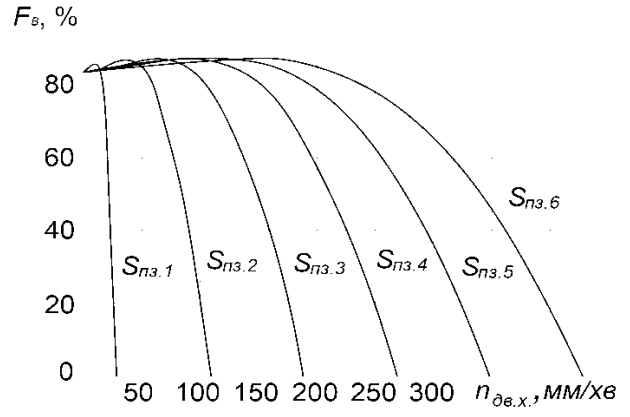


Рис. 12. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_g від частоти $n_{\text{об.х.}}$ осциляцій обкатників при заданих $S_{\text{пз}}$: $S_{\text{пз.1}}=50$ мм/хв; $S_{\text{пз.2}}=200$ мм/хв; $S_{\text{пз.3}}=350$ мм/хв; $S_{\text{пз.4}}=500$ мм/хв; $S_{\text{пз.5}}=650$ мм/хв; $S_{\text{пз.6}}=800$ мм/хв

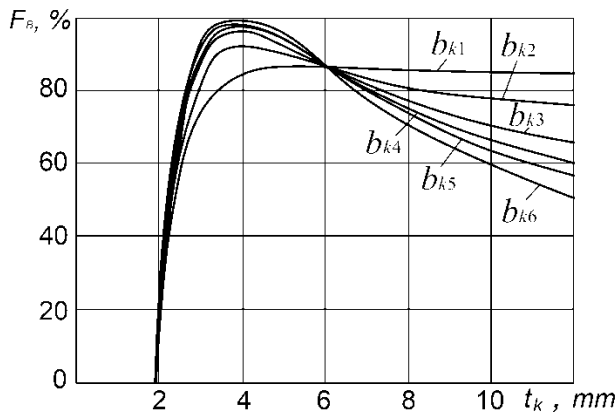


Рис. 13. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_g від кроку канавки t_k при заданих $e_{\text{кр}}$: $e_{\text{кр.1}}=1$ мм; $e_{\text{кр.2}}=3$ мм; $e_{\text{кр.3}}=6$ мм; $e_{\text{кр.4}}=9$ мм; $e_{\text{кр.5}}=12$ мм; $e_{\text{кр.6}}=15$ мм

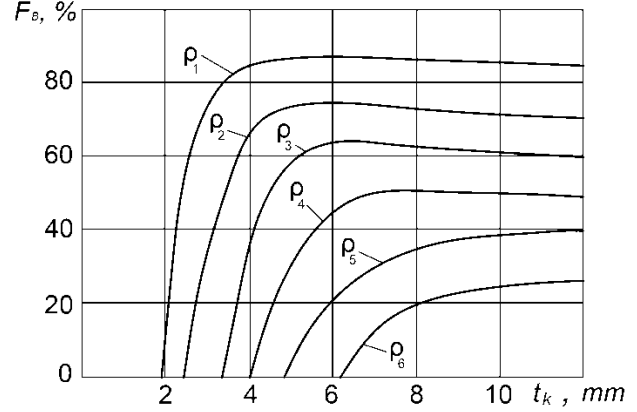


Рис. 14. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_g від кроку канавки t_k при заданих ρ : $\rho_1=1$ мм; $\rho_2=2$ мм; $\rho_3=3$ мм; $\rho_4=4$ мм; $\rho_5=5$ мм; $\rho_6=6$ мм

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведені дослідження дозволяють встановити вплив геометричних параметрів мікрорельєфу (ширини канавки, амплітуди канавки мікрорельєфу та осевого кроку канавки) та технологічних параметрів його формування (швидкості подачі, кількості подвійних ходів при вібраційному способі формування мікрорельєфу) на зміну відносної площі регулярного мікрорельєфу. Встановлено оптимальні межі залежних параметрів для забезпечення заданої відносної площі віброобточування регулярних мікрорельєфів, сформованих на плоских поверхнях.

Література

1. ДСТУ ISO 4287:2012. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури (ISO 4287:1997, IDT + ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT + ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT).
2. ДСТУ ISO 4288-2001. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Правила і процедури оцінювання структури (ISO 4288:1996, IDT).
3. ISO 1302:2002. (2002). Geometrical Product Specifications (GPS) – [Indication of surface texture in technical product documentation].
4. ISO 13565-2:1996. (1996). Geometrical Product Specifications (GPS) – [Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties – Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve].
5. 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.
6. Grützmacher P.G.; Profito F.J.; Rosenkranz A. Multi-Scale Surface Texturing in Tribology—Current Knowledge and Future Perspectives. *Lubricants* 2019, 7(11), 95; <https://doi.org/10.3390/lubricants7110095>.
7. ГОСТ 24773-81. Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики. Введ. 1982–07–01. – М. : Изд.-во стандартов, 1988. – 14 с.
8. 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.
9. Hamdi Amine. (2020). Effect of cutting variables on bearing area curve parameters (BAC-P) during hard turning process. *Archive of Mechanical Engineering*, 67. 73-95. 10.24425/ame.2020.131684.
10. Cao C., Zhu J., Tanaka T. (2020) Influence of Burnishing Process on Microstructure and Corrosion Properties of Mg Alloy AZ31. In: Itoh S., Shukla S. (eds) *Advanced Surface Enhancement. INCASE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1_11.
11. Zhan X, Yi P, Liu Y, Xiao P, Zhu X, Ma J. Effects of single- and multi-shape laser-textured surfaces on tribological properties under dry friction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020;234(7):1382-1392. doi:10.1177/0954406219892294.
12. 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).
13. 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>.
14. 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>
15. 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* 12(24), 4169 (2019); doi:10.3390/ma12244169.
16. Jianfei Wang, Weihai Xue, Siyang Gao, Shu Li, Deli Duan. Effect of groove surface texture on the fretting wear of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*. Vol. 486-487, 2021, 204079, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204079>.
17. 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. (in Ukrainian).
18. 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.
19. 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.
20. 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.

21. 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.

22. 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>.

23. Wos S., Koszela W., Pawlus P. Comparing tribological effects of various chevron-based surface textures under lubricated unidirectional sliding. Tribology International 146 (2020) 106205. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106205> (дата звернення: 01.10.2020).

24. Дзюра В.О., Марушак П.О., Семеген В.О., Головка В.В., Федів В.Я. Обґрунтування параметрів регулярних мікрорельєфів сформованих на плоских поверхнях. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39), I, с. 37-47.

References

1. DSTU ISO 4287:2012. Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Terminy, vyznachennia poniat i parametry struktury (ISO 4287:1997, IDT + ISO 4287:1997/Soh 1:1998, IDT + ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT).

2. DSTU ISO 4288-2001. Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Pravyla i protsedury otsinennia struktury (ISO 4288:1996, IDT).

3. ISO 1302:2002. (2002). Geometrical Product Specifications (GPS) – [Indication of surface texture in technical product documentation].

4. ISO 13565-2:1996. (1996). Geometrical Product Specifications (GPS) – [Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties – Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve].

5. 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.

6. Grützmacher P.G.; Profito F.J.; Rosenkranz A. Multi-Scale Surface Texturing in Tribology—Current Knowledge and Future Perspectives. Lubricants 2019, 7(11), 95; <https://doi.org/10.3390/lubricants7110095>.

7. HOST 24773-81. Poverkhnosty s rehulirnymy mykrorelefofom. Klassyfykatsiya, parametry y kharakterystyky. Vved. 1982–07–01. – M. : Yzd.-vo standartov, 1988. – 14 s.

8. 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.

9. Hamdi Amine. (2020). Effect of cutting variables on bearing area curve parameters (BAC-P) during hard turning process. Archive of Mechanical Engineering. 67. 73-95. [10.24425/ame.2020.131684](https://doi.org/10.24425/ame.2020.131684).

10. Cao C., Zhu J., Tanaka T. (2020) Influence of Burnishing Process on Microstructure and Corrosion Properties of Mg Alloy AZ31. In: Itoh S., Shukla S. (eds) Advanced Surface Enhancement. INCASE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1_11.

11. Zhan X, Yi P, Liu Y, Xiao P, Zhu X, Ma J. Effects of single- and multi-shape laser-textured surfaces on tribological properties under dry friction. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020;234(7):1382-1392. doi:10.1177/0954406219892294.

12. 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).

13. Pawlus P.; Reizer R.; Wiczorowski 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>.

14. 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>

15. Pawlus P., Reizer R., Wiczorowski M. 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.

16. Jianfei Wang, Weihai Xue, Siyang Gao, Shu Li, Deli Duan. Effect of groove surface texture on the fretting wear of Ti–6Al–4V alloy. Wear. Vol. 486–487, 2021, 204079, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204079>.

17. 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. (in Ukrainian).

18. 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](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.044).

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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>.

23. Wos S., Koszela W., Pawlus P. Comparing tribological effects of various chevron-based surface textures under lubricated unidirectional sliding. Tribology International 146 (2020) 106205. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106205> (data zvernennia: 01.10.2020).

24. Dziura V.O., Marushchak P.O., Semehen V.O., Holovko V.V., Fediv V.Ia. Obgruntuvannia parametriv rehulirnykh mikroreliefiv sformovanykh na ploskykh poverkhniakh. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. 2023. Vyp. 8(39), I, s. 37-47.