

## **ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 621.839

### **ВПЛИВ ДИСКРЕТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ ТОПОГРАФІЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ НА ЇХ ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

*<sup>1)</sup>Антонюк В.С., <sup>2)</sup>Возненко В.В., <sup>1)</sup>Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна, <sup>2)</sup>ВАТ "НВК" Київський завод автоматики ім. Г.І. Петровського", м. Київ, Україна*

*Приведено результати досліджень впливу параметрів дискретно-орієнтованої топографії поверхонь пар тертя на інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя. Отримана математична модель оцінки трибологічних характеристик фрикційних поверхонь. Показано, що поверхня з дискретно-орієнтованою топографією знижує інтенсивності зношування і коефіцієнт тертя.*

#### **Вступ. Постановка завдання**

Інтенсивність зношування твердих тіл у парах тертя в загальному випадку залежить від фізичних, хімічних і механічних явищ, що відбуваються у контакті, а також від параметрів суто контакту. Закономірності зношування вузлів тертя за такою кількістю чинників впливу встановлюються експериментально [1, 2].

Аналіз теоретичних та емпіричних залежностей експлуатаційних властивостей деталей та їх з'єднань доводить, що вони залежать від параметрів якості їх робочих поверхонь - геометричних параметрів, шорсткості, твердості, глибини зміцненого шару, поверхневих напружень тощо. Контактний тиск, колова швидкість в рухомому сполученні є основними показниками, що характеризують режим тертя вузла, який може змінюватися від сухого тертя до гідродинамічного зі зміною коефіцієнту тертя від 0,5 до 0,001. Тиск визначає низку робочих параметрів при гідродинамічному терті: товщину масляної плівки, несучу здатність поверхні тертя і мастила, гідравлічний опір зазору між втулкою і валом, залежність сили тертя в зоні контакту, мастилоємність і інтенсивність зношування поверхні тертя деталей. Експлуатаційним показникам в сталому режимі найповніше відповідають такі триботехнічні характеристики поверхні тертя, як зносостійкість робочих поверхонь і коефіцієнт тертя [3, 4].

Одним з перспективних напрямків, які забезпечують показники якості поверхневого шару на рівні, що відповідає максимальному підвищенню експлуатаційних властивостей деталей, є поверхнево-пластична деформація внаслідок якої можна сформувати поверхневий шар підвищеної твердості із залишковими напруженнями стиску та особливою топографією поверхні.

Застосувавши метод фінішної поверхнево-пластичної деформації можна отримати поверхню з дискретно-орієнтованою топографією (ДОТ) заданої конструкції, що забезпечить необхідну мастилоємність та зносостійкість робо-

чих поверхонь [5, 6]. Вибір раціональних геометричних параметрів поверхні тертя з ДОТ, що забезпечать якісні експлуатаційні показники вузлів приладів та механізмів, експериментально є недостатньо обґрунтованим відповідно до матеріалів пари тертя, умов експлуатації, мастила тощо.

**Метою досліджень** є експериментальне визначення з раціональних параметрів поверхонь тертя, які забезпечують зниження інтенсивності зношування та коефіцієнту тертя у заданому діапазоні навантажень та швидкостей.

### Методика досліджень

Для випробувань використовували вузол тертя, що складається з втулки і валу. На внутрішній поверхні тертя втулки сформовано дискретно-орієнтовану топографію поверхні з рівномірним розміщенням опорних мікролунок (рис. 1), де  $A$  – крок між мікролунками вздовж малої осі еліпса,  $B$  - великої осі еліпса;  $a$  - половина малої осі еліпса мікролунки та  $b$  – великої осі [5].

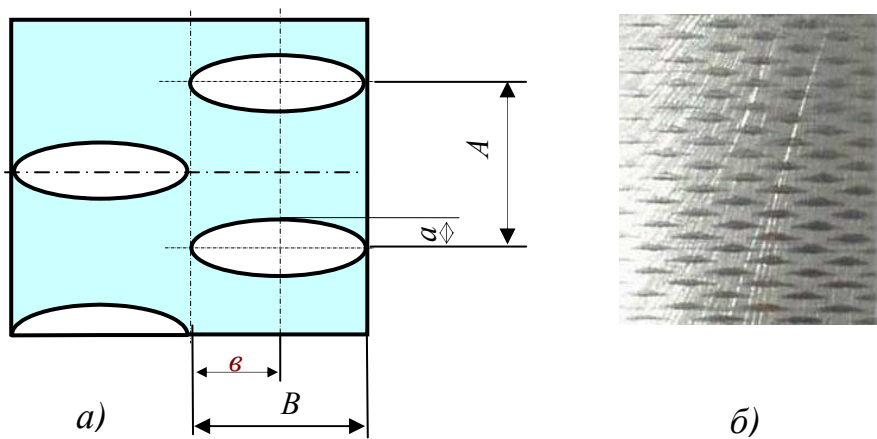


Рисунок 1 – Схема розміщення мікролунок на поверхні (а) та фрагмент поверхні втулки з дискретно-орієнтованою топографією (б)

При відборі зразків втулки зі сплаву алюмінію АК6 ГОСТ 4784-97 (твердість поверхні по Віккерсу:  $HV \cong 1,0$  ГПа) і валу зі сталі 18X2H4МА ГОСТ 4543-71 ( $HV \cong 3,2$  ГПа або  $H_{RC} \sim 55$ ) проводились вимірювання та контроль фізико-механічних і геометричних параметрів. Ширина втулки складала 22 мм, діаметр втулки і валу - 40 мм, а зазор між ними - 4 мкм.

Довжина й глибина мікролунок сформованої ДОТ поверхні знаходились в діапазоні 1,5...7 мм і 0,01...0,04 мм, відповідно, а крок між лунками - 0,8...5 мм. Шорсткість досліджуваної поверхні втулки  $Ra = 0,32$  мкм і валу  $Ra = 0,8$  мкм. Геометричні похибки поверхонь тертя (овальність, конусність тощо) контролювалися нутроміром з точністю вимірювань 0,005 мм.

Дослідження процесу зношування проводили за допомогою стенду на базі верстата типу 16K20 з частотою обертання валу  $n = 1420$  хв<sup>-1</sup>. Вал пари тертя встановлювали у шпинделі токарного верстата, а в різцеутримувач токарного верстата закріплювали спеціально розроблений пристрій для триботехнічних випробувань (ПТВ), що моделює експлуатаційні чинники в широкому діапазо-

ні. Пристрій ПТВ забезпечує контрольоване радіальне навантаження в зоні тертя. Випробування проводиться з мастилом ХФ 12-16 ГОСТ 5546-86. Для змащування і розподілу мастила по поверхні контакту пари тертя використовується безперервне підведення змащувального матеріалу. Переваги даної схеми змащування зони тертя полягають у тому, що продукти зносу виносяться разом з мастилом, а в зону тертя безперервно надходить нове мастило.

Дослідження проводиться з використанням плану експерименту за методом ПФЕ  $2^3$  [7]. Для дослідження інтенсивності зношування обрано план повного факторного експерименту ПФЕ  $2^3$  зі зміною шкали вихідної величини на  $\ln y$  з метою визначення степеневі залежності зношування від вибраних чинників, а для коефіцієнту тертя, який не може бути адекватно описаний лінійною моделлю, вибрано ортогональний центрально-композиційний план другого порядку (ОЦКП).

Як функції відгуку вибрані лінійна інтенсивність зношування  $I_h$  і коефіцієнт тертя  $f$ . Як варійовані чинники обирали:  $P$  – нормальне навантаження на пару тертя в діапазоні 55...150 Н;  $\Psi$  – щільність мікролунок ДОТ поверхні тертя втулки в діапазоні 15...40 %;  $h$  – глибина еліпсоїдної мікролунки в діапазоні 0,01...0,04 мм;  $\text{tg}\beta$  – відношення глибини еліпсоїдної лунки  $h$  до половини її довжини  $e$ , який змінюється в діапазоні 0,018...0,062 при  $e = 0,8...3,5$  мм. При цьому визнали інтегральний вплив мікролунок з кутом  $\beta$  на гідродинамічний режим тертя залежним від щільності мікролунок. Оскільки кожна мікролунка є мініклином з кутом  $\beta$  у напрямі вектора швидкості, то при певних швидкостях і тиску сумарний вплив мікролунок може істотно позначатися на терті. Збільшення кута експоненціально збільшує несучу здатність мастила, зменшуючи коефіцієнт тертя, і в той же час зі збільшенням кута експоненціально росте гідравлічний опір, що підвищує коефіцієнт тертя.

Визначення коефіцієнту тертя  $f$  здійснювалось перерахунком вимірюваного моменту тертя  $M_f$ . Для розрахунку використовували значення середньої величини моменту тертя після стабілізації, пов'язаної з припрацюванням поверхні (після 10...20 хв від початку досліду), при цьому час випробувань приймався однаковим для всіх дослідів і складав 60 хвилин.

Для визначення моменту тертя при трибологічних дослідженнях сформованої ДОТ поверхні застосовувався вимірювальний модуль, що складається з пристрою для дослідження моменту кручення валів на основі магнетопружного торсіометра та електронного модуля перетворення та індикації моменту тертя [8]. Вимірювальний модуль дозволяє безперервно вимірювати і реєструвати момент тертя в парі “вал-втулка”.

Момент сили тертя, діючий в контакті “вал-втулка”, визначається силою тертя в контакті  $F_f$ , та плечем моменту тертя  $R_1$ , що дорівнює радіусу втулки  $M_f = F_f \cdot R_1$ . Коефіцієнт тертя визначали за формулою:

$$f = \frac{F_f}{P_n} = \frac{M_f}{R_1 \cdot P_n},$$

де  $P_n$  – нормальна складова сил, що виникають у зоні контакту поверхонь тертя.

Дослідження процесу зношування проводилось при постійній частоті обертання валу  $1420 \text{ хв}^{-1}$  ( $v = 2,976 \text{ м/с}$ ), нормальне навантаження  $P_n$  на втулку в процесі випробування було постійним і задавалося за допомогою пристрою ПТВ, час випробувань був однаковим для всіх дослідів – 10 год.

У процесі тертя на поверхні втулки утворюється лунка зношування, а вал зношується по твірній довжиною, близькою до ширини втулки. Вимірювання геометричних параметрів зношування валу проводилося на оптиметрі горизонтальному – ИКГ, а для вимірювання лунки зношування на поверхні втулки застосовувався великий інструментальний мікроскоп БМИ. Кожен лінійний розмір зношування валу і втулки вимірювався у 10 різних перетинах, потім розраховувалася їх середня величина.

Інтенсивність зношування поверхонь в парі тертя “вал-втулка” має свою відмінність. У процесі тертя збільшується номінальна площа контакту взаємодіючих поверхонь, отже, навіть при постійному навантаженні валу змінюються тиск в контакт і інтенсивність зношування поверхонь. Поверхня втулки, що знаходиться у контакт з валом, унаслідок зношування постійно змінюється. Для визначення інтенсивності зношування за лінійними розмірами зношування деталей пари тертя “вал-втулка” використана методика [9], за якою необхідно провести до випробувань вимірювання діаметрів втулки і валу, при випробуваннях – частоту обертання валу і час випробувань, а після випробувань – діаметр валу і ширину лунки зношування на втулці [9].

### **Результати дослідження коефіцієнту тертя**

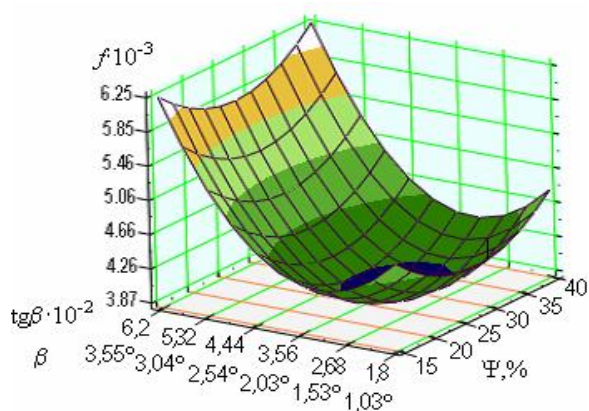
У наслідок проведених експериментів по дослідженню коефіцієнта тертя отримана адекватна математична модель залежності коефіцієнту тертя робочої поверхні від геометричних параметрів ДОТ:  $\text{tg}\beta = h/e$ , щільності мікролунок ( $\Psi$ ), та , навантаження ( $P, H$ ), що має вигляд:

$$f = 8,2014 \cdot 10^{-3} + 2,2591 \cdot 10^{-6} \cdot P - 2,7886 \cdot 10^{-4} \cdot \Psi - 0,2139 \cdot \text{tg} \beta + \\ + 4,79 \cdot 10^{-6} \cdot \Psi^2 + 0,98347 \cdot \text{tg}^2 \beta + 3,9364 \cdot 10^{-7} \cdot P \cdot \Psi + 1,3523 \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot \text{tg} \beta + \\ + 5,4091 \cdot 10^{-3} \cdot \Psi \cdot \text{tg} \beta - 5,4091 \cdot 10^{-5} \cdot P \cdot \Psi \cdot \text{tg} \beta \quad (1)$$

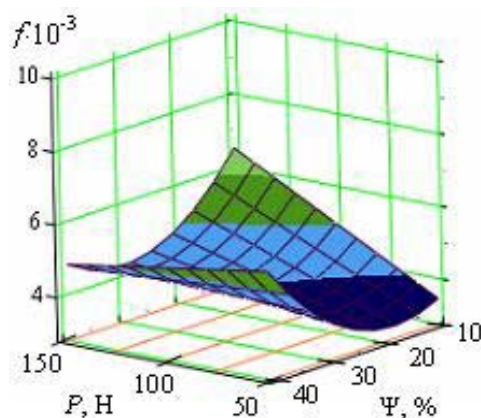
Як довів аналіз математичної моделі (рис.2) при застосуванні ДОТ поверхні мінімальний коефіцієнт тертя становить  $f_{60} = 0,0030$  при навантаженні в 60 Н і лінійно зростає до  $f_{140} = 0,004$  при навантаженні в 140 Н. Дослідження аналогічного вузла тертя з робочою поверхнею без ДОТ при навантаженні в 60 Н і 140 Н показали, що мінімальна величина коефіцієнту тертя становила  $f = 0,0065$  при навантаженні в 60 Н, а максимальна  $f = 0,013$  при 140 Н. Це підтверджує вплив ДОТ поверхні на гідродинамічний режим при терті, оскільки при малих навантаженнях коефіцієнт тертя знизився майже у два рази, а при найбільшому навантаженні більш ніж у три рази.

Як видно з рис. 2а кут нахилу профілю лунки в напрямку вектора швидкості і щільність мікролунок відіграють значну роль у зниженні коефіцієнту тертя.

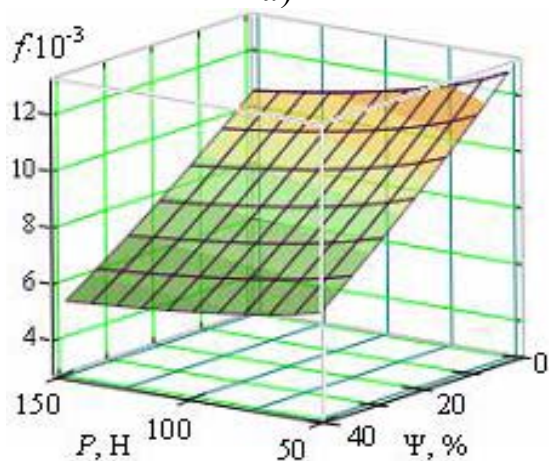
Отже при  $P = 60$  Н він знаходиться в області з  $\Psi = 15\%$ ,  $\text{tg}\beta = 0,0488$ , або  $\beta = 2,79^\circ$ ; при  $P = 100$  Н – в області з  $\Psi = 24\%$ ,  $\text{tg}\beta = 0,04$  ( $\beta = 2,29^\circ$ ); при  $P = 140$  Н – в області з  $\Psi = 36\%$ ,  $\text{tg}\beta = 0,053$  ( $\beta = 3^\circ$ ).



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Залежність коефіцієнту тертя  $f$  в парі “вал-втулка” від геометричних параметрів ДОТ поверхні втулки: кута нахилу профілю лунки  $\beta$  і щільності мікролунок  $\Psi$  при навантаженні  $P = 100$  Н (а), від навантаження і щільності мікролунок при куті нахилу профілю лунки  $\beta = 1,72^\circ$  (б), та відповідний розрахунок за теоретичною моделлю (в)

Залежність коефіцієнту тертя  $f$  у парі “вал-втулка” від робочого навантаження  $P$  та щільності мікролунок  $\Psi$  при постійному куті  $\beta = 1,72^\circ$  показана на рис. 2 б. При постійній щільності мікролунок мінімальне значення коефіцієнту тертя зростає зі збільшенням навантаження, зміщуючись у бік збільшення кута профілю лунки від  $\beta = 1,7^\circ$  при  $P = 50$  Н до  $\beta = 2,7^\circ$  при  $P = 150$  Н. Це означає, що зі збільшенням навантаження збільшення кута профілю лунки забезпечує підвищення несучої здатності масляної плівки, хоча при цьому і зростає гідравлічний опір.

Аналогічно на коефіцієнт тертя впливає щільність мікролунок. При постійному куті профілю лунки  $\beta = 1,72^\circ$  раціональна щільність мікролунок змінюється від  $\Psi = 20\%$  при навантаженні  $P = 50$  Н до  $\Psi = 28\%$  при навантаженні  $P = 150$  Н.

Отже аналіз показав, що формування ДОТ робочої поверхні тертя може забезпечити зниження коефіцієнту тертя у рухомому вузлі майже у три рази.



Порівняння з розрахунком за теоретичною моделлю [6] в режимі окисного тертя без змащування (рис. 2 в) показує якісний збіг результатів досліджень. Тому для первинного розрахунку параметрів ДОТ поверхні можна застосовувати методику теоретичного розрахунку коефіцієнту тертя.

### Результати дослідження інтенсивності зношування

У наслідок проведених експериментальних досліджень отримана адекватна математична модель залежності лінійної інтенсивності зношування ДОТ поверхні втулки у парі тертя “вал-втулка” –  $I_h$ , від геометричних параметрів поверхні: щільності  $\Psi$ , % та глибини мікролунок  $h$ , а також робочого навантаження вузла  $P$ , Н:

$$I_h = 3,442 \times 10^{-14} \cdot \frac{P^{0,571} \cdot (\Psi - 100)^2 \cdot (100 - \Psi)^{0,399}}{h^{0,706}} \quad (2)$$

Як показав аналіз отриманих результатів і підвищенням питомого тиску у вузлі інтенсивність зношування зростає, тоді як збільшення щільності, і глибини мікролунок зменшує інтенсивність зношування у всьому діапазоні навантаження (рис. 3). При цьому більший вплив на зниження інтенсивності зношування виявляє глибина мікрорунки, так як вона значно менше впливає на зменшення несучої поверхні тертя, ніж їх щільність.

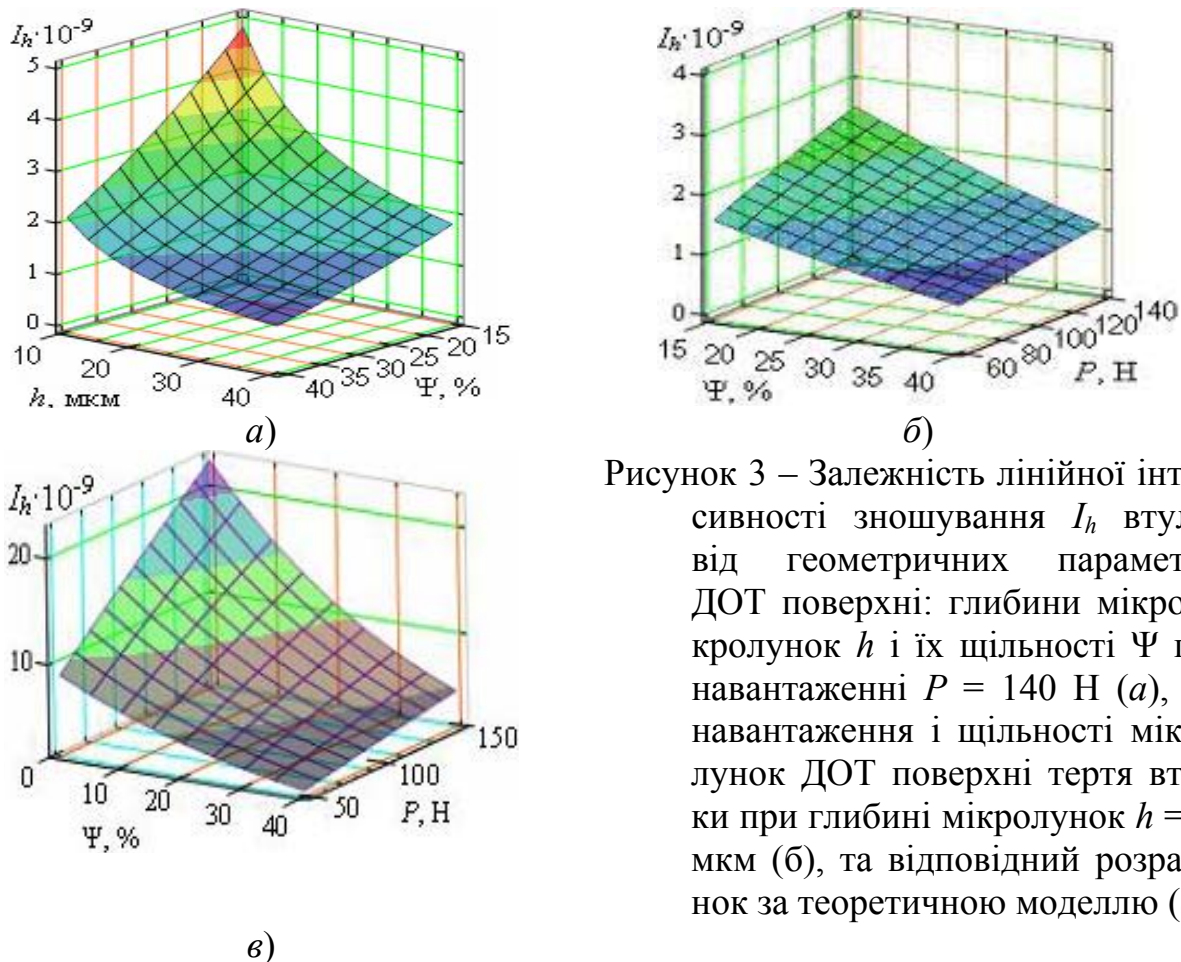


Рисунок 3 – Залежність лінійної інтенсивності зношування  $I_h$  втулки від геометричних параметрів ДОТ поверхні: глибини мікрорунки  $h$  і їх щільності  $\Psi$  при навантаженні  $P = 140$  Н (а), від навантаження і щільності мікрорунки ДОТ поверхні тертя втулки при глибині мікрорунки  $h = 25$  мкм (б), та відповідний розрахунок за теоретичною моделлю (в).

При постійній глибині мікролунок в 25 мкм зростання щільності мікролунок від 15% до 40% зменшує інтенсивність зношування в  $\sim 2,3$  рази незалежно від навантаження. При щільності мікролунок в 25% зростання глибини мікролунок від 10 мкм до 40 мкм зменшує інтенсивність зношування в  $\sim 2,7$  рази. При максимальному навантаженні вузла зменшення інтенсивності зношування зі зростанням глибини мікролунок трохи нижче ніж при мінімальному навантаженні.

Дослідження інтенсивності зношування валу, на якому ДОТ поверхня не формувалась, показало відповідне зниження інтенсивності зношування, що відповідає зауваженню Костецького, що для збільшення зносостійкості деталей вузла тертя достатньо забезпечити якісні трибологічні показники поверхні однієї з деталей [1]. Збільшення щільності мікролунок від 15% до 40% на поверхні втулки знижує інтенсивність зношування валу у 1,5 рази (у середньому з  $0,7 \cdot 10^{-10}$  до  $0,45 \cdot 10^{-10}$ ), а збільшення глибини мікролунок від 10 до 40 мкм – у 1,25 рази (в середньому з  $1 \cdot 10^{-9}$  до  $0,8 \cdot 10^{-10}$ ).

Порівняння лінійної інтенсивності зношування за теоретичною моделлю в режимі окисного тертя без змащування (рис. 3 в), показує задовільний збіг результатів досліджень. Отже для оцінки зношування вузла з ДОТ поверхні тертя можна застосовувати методику теоретичного розрахунку інтенсивності зношування [6] за параметрами матеріалу, деталей та вузла, режимами експлуатації.

### **Висновки**

Проведений аналіз результатів експерименту та їх порівняння з результатами аналітичного дослідження показали, що формування дискретно-орієнтованої поверхні тертя забезпечує раціональну мастилоємність, знижує коефіцієнт тертя у рухомому вузлі майже у три рази і підвищує зносостійкість поверхонь тертя в 1,5...3 рази, що підвищує надійність та довговічність вузлів та деталей приладів.

Подальший напрямок досліджень параметрів дискретно-орієнтованої топографії поверхні тертя дозволить створити теоретичні засади розрахунку зносостійкості пар тертя.

### **Література**

1. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техника, 1970. – 396 с.
2. Трение, изнашивание и смазка. Справочник: В 2-х кн. Кн.1 / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисына. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
3. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей – резерв в повышении конкурентоспособности машин // Справочник. Инженерный журнал: Приложение. – 2001. – № 4. – С. 3-9.
4. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов. – М.: Высш.шк, 1991. – 319 с.
5. Возненко В.В. Обґрунтування параметрів дискретно-орієнтованих поверхонь деталей пар тертя // Зб. наук. пр. НТУ „ХПІ” «Високі технології в машинобудуванні». – Харків, 2005. – Вип. 2(11). – С.74-83.
6. Возненко В.В. Визначення експлуатаційних характеристик фрикційних поверхонь // Вісник Сумського державного університету. Сер. Технічні науки (Машинобудування). – Суми: СумДУ, 2006. – № 11(83) 2005. – С.33-39.

7. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.– М: Наука, 1976.– 280 с.
8. Одинец С. С., Топилин Г. Е. Средства измерения крутящего момента: Библиотека приборостроителя. – М.: Машиностроение, 1977. – 160 с.
9. Триботехнология формирования поверхностей / Чеповецкий Н.Х., Ющенко С.А., Бараболя А.В., Павлский В.М., Огородник В.В., Ляшко В.А., Дмитриева Т.В. – К.: Наукова думка, 1989. – 229 с.

|   |  |
|---|--|
| <p>Антониук В.С., Возненко В.В. <b>Влияние дискретно-ориентированной топографии поверхности деталей на их трибологические характеристики</b></p> <p>Приведены результаты исследований влияния параметров дискретно-ориентированной топографии поверхностей пар трения на интенсивность изнашивания и коэффициента трения. Получена математическая модель оценки трибологических характеристик фрикционных поверхностей. Показано, что поверхность с дискретно-ориентированной топографией снижает интенсивность изнашивания и коэффициент трения.</p> | <p>Antoniuk V.S., Voznenko V.V. <b>The discreet-oriented topography of the surface of details at this tribological characteristic</b></p> <p>It's given the results of friction pares surfaces investigation discreet-oriented topography parameters influence investigations on intensity of wear and coefficient of friction. There is taken mathematical model of friction surfaces tribological characteristic assessment It's shown, that surface with discreet-oriented topography increases intensities of wear and friction coefficient.</p> |
|---|--|

*Надійшла до редакції  
9 червня 2006 року*

УДК 621

## КОНТАКТНЫЕ НАГРУЗКИ НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТА

*Усачев П.А., Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", г. Киев, Украина*

*В статье рассмотрены контактные нагрузки на передней поверхности рабочей части инструмента сложной формы заточки*

### **Введение. Постановка задачи**

Характер распределения нормальных и касательных нагрузок на передней поверхности рабочей части инструмента является важным аспектом механики процесса резания, поскольку он отражает условия силового нагружения и трения между материалом стружки и инструмента.

Знание условий нагружения и трения позволяет детально исследовать такие вопросы, как износ передней поверхности; распределение температур, деформаций и напряжений как на передней поверхности, так и внутри режущего клина; действие смазочно-охлаждающих технологических средств и др.

Поэтому проблеме исследования распределения нагрузок на передней поверхности инструмента посвящено большое число работ теоретического и экс-