

УДК: 621.891

О.В. Диха, С.Ф. Посонський, О.М. Маковкін, А.А. Вичавка*Хмельницький національний університет***РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ НАПРЯМНИХ КОВЗАННЯ**

Запропоновано розрахункові залежності для визначення кінетики зміни трибоконтанних параметрів в процесі зношування для мастильного профілю змінної глибини. Проведений розв'язок зносоконтактної задачі для плоских напрямних ковзання. За базову модель зношування прийнята лінійна залежність від безрозмірних комплексів контактного тиску і швидкості ковзання. Отримана формула для розрахунку зносу напрямних ковзання в залежності від шляху тертя.

Ключові слова: напрямна ковзання, мастильні канавки, контактний тиск, знос, трикутний профіль.

А.В. Дыха, С.Ф. Посонский, О.М. Маковкин, А.А. Вичавка**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ НАПРАВЛЯЮЩИХ СКОЛЬЖЕНИЯ**

Предложены расчетные зависимости для определения кинетики изменения трибоконтантных параметров в процессе изнашивания для масляного профиля переменной глубины. Проведено решение износоконтактной задачи для плоских направляющих скольжения. За базовую модель изнашивания принята линейная зависимость от безразмерных комплексов контактного давления и скорости скольжения. Получена формула для расчета износа направляющих скольжения в зависимости от пути трения.

Ключевые слова: направляющая скольжения, смазочные канавки, контактное давление, износ, треугольный профиль.

O. Dykha, S. Posonsky, O. Makovkin, A. Vychavka**ESTIMATION OF WEAR RESISTANCE OF MATERIALS SLIDING GUIDES**

The literary analysis of the known approaches to estimate the wear resistance of materials sliding guides of the process equipment is conducted. The design dependencies for determining the kinetics of change of tribo-contact characteristics in the process of wear of slide guide with lubrication grooves of variable depth: from a maximum at the center of the rail to a minimum at its edges is proposed. Held the solution of wear-contact problem for the flat slideways. For the base model of the wear adopted linear dependence on the dimensionless complexes of the contact pressure and sliding speed. The formula for calculating the wear of slides depending on the road friction and the example of calculation of the wear rail. The resulting method of calculation guides with oil grooves are recommended for prediction of wear at the design stage and optimization of constructive and technological parameters of the guide according to the criterion of wear.

Keywords: guide sliding, lubricating groove, contact pressure, wear, triangular profile.

Постановка проблеми. Напрямні ковзання відносять до опорних деталей машин, які забезпечують задане взаємне розміщення рухомих вузлів і можливість їх переміщення в напрямі прямолінійного руху. На відміну від інших пар тертя напрямні відносяться до відкритого незамкненого типу, у яких довжина зони контакту одного з елементів менше довжини другого елемента.

На робочих поверхнях напрямних може виникати тертя ковзання або тертя кочення. Напрямні ковзання зворотно-поступального руху простіші за конструкцією і технологією виготовлення, їх широко використовують в будові металорізальних і деревообробних верстатів, ковальсько-пресового обладнання, підйомно-транспортних машин, приладів тощо.

Стійкість проти зношування робочих поверхонь напрямної з тертям ковзання перевіряють за умовою збереження шару мастила у зоні максимального тиску. Для зменшення тертя, зношування та запобігання задиркам тертьових поверхонь напрямних метало- та деревообробних верстатів, пресів, контрольно-вимірних приладів застосовують спеціальні індустріальні мастила. Змащувальні вузли та деталі залежно від застосованого обладнання значно відрізняються умовами роботи, температурними, навантажувальними та іншими характеристиками. Для мащення напрямних ковзання високоточних металорізальних верстатів, умови роботи яких відрізняються високими навантаженнями й можливістю дуже низьких швидкостей руху, застосовують особливу групу антистрибкових індустріальних мастил.

Для підвищення довговічності напрямних машин при терті і зношуванні на їх поверхню додатково наносять різні маслоутримувальні мікро- і макрорельєфи. Чим надійніше утримується мастильний матеріал між контактуючими деталями, тим менше вони зношуються. Профіль поверхні відіграє тут головну роль. Створені при обробці канавки на поверхні виконують функцію резервуарів для утримання і розподілу масла. За допомогою теоретичних досліджень,

лабораторних і експлуатаційних випробувань визначається який тип, форма і глибина профілю є найприйнятнішими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За призначенням і характерними умовами роботи напрямні ковзання поділяють на декілька груп [1-3]. До першої групи належать напрямні верстатів для механічної обробки деталей, які відрізняються великими довжинами ходу і широким діапазоном швидкостей (від надто малих швидкостей подачі до значних швидкостей головного руху) і високими вимогами щодо точності. До другої групи належать напрямні ковальсько-пресового обладнання, для яких в напрямі переміщення характерні великі осьові навантаження, а у деяких випадках і підвищені температури. До третьої групи відносяться напрямні повзунів кривошипно-шатунних механізмів, зокрема двигунів внутрішнього згоряння, які сприймають навантаження в одній площині при високих швидкостях і підвищених температурах. Четверту групу складають напрямні ковзання вимірювальних приладів, які відрізняються малими навантаженнями і особливо високими вимогами щодо точності розміщення в них рухомих деталей.

Різноманітність функціонального призначення напрямних обумовила конструктивні різновидності форми їх поперечного перерізу [3, 4]: прямокутні, трикутні (V – подібні), трапецієвидні (ластівчин хвіст), круглі та комбіновані. Умови роботи напрямних ковзання кожної групи різні, проте всі вони повинні забезпечити мінімальні за даних умов роботи втрати на тертя і зберігати точність положення і переміщення рухомих елементів в процесі роботи механізму, яка передусім залежить від зносу напрямних. Дослідження механізму тертя напрямних ковзання, особливостей їх навантаження і зносу проведені багатьма вченими і науковими школами, серед яких широко відомі роботи Д. М. Решетова, І. В. Крагелського, О. С. Пронікова та інших вчених.

З огляду на те, що основною галуззю застосування напрямних ковзання є верстатобудування, а точність та довговічність напрямних у значній мірі визначає працездатність верстатів, то особливості навантаження і зношування напрямних металорізальних верстатів, досліджені найбільш досконало. В результаті огляду літературних джерел [2-5] визначено, що переважна кількість верстатів виходять з ладу через знос деталей, який різко знижує точність обробки, зменшує продуктивність через простой, вимагає значних виробничих потужностей і кваліфікованих кадрів для ремонту. Витрати на ремонт верстатного обладнання загального призначення, віднесені до року експлуатації, складають до 10% його початкової вартості.

Зносу піддається широка номенклатура деталей, до яких насамперед відносять напрямні, оскільки їх знос визначає періоди між капітальними ремонтами. Наведені Д. М. Решетовим [4] показники сумарної роботи напрямних поздовжньої і поперечної подачі верстатів оцінюють коефіцієнтом, що визначає відносну тривалість роботи напрямних у відсотках до тривалості робочої зміни.

Умови роботи напрямних металорізальних верстатів характеризують наступні чинники: тиск та його змінність під час реверсивного руху; швидкість ковзання та змащування напрямних; температура та забруднення напрямних або мастила відходами обробки (стружкою, піском, окалиною, абразивом) тощо.

Модифікація поверхонь напрямних ковзання маслоутримувальними профілями отримало широке застосування і потребує подальших досліджень з метою підвищення зносостійкості матеріалів напрямних. Серед параметрів регулярних мастильних профілів важливими, з погляду формування експлуатаційних характеристик поверхні, є: напрямок ліній профілю щодо напрямку відносного ковзання, відносна площа поверхні (відношення площі, зайнятої канавками, до загальної площі), глибина і форма змащувальних канавок. Узагальнюючи результати досліджень зносостійкості поверхонь з регулярним рельєфом [6-11], можна намітити певні рекомендації щодо приведених вище параметрів. Кращі результати дають поперечні відносно напрямку переміщення канавки, оскільки в цьому випадку забезпечуються більш сприятливі умови для мащення, і в цілому поверхня має більшу несучу здатність в порівнянні з поздовжніми канавками. Що стосується відносної площі поверхні, то тут оптимальними вважаються випадки, коли площа змащувальних канавок складає 40 - 50 % від загальної площі поверхні.

В практиці широко використовують масляні канавки різної форми і напряму на поверхнях напрямних верстатів. Поздовжні або поперечні канавки мають, як правило, однаковий перетин по глибині канавки на всій довжині. Особливістю таких канавок є незмінність несучої здатності по всій довжині і можливість витікання масла через бічні грані для напрямних з різних матеріалів [12].

Для плоских напрямних поверхонь в роботах [12-14] запропонований профіль маслоутримувальних канавок із змінною глибиною від максимальної в центрі несучої поверхні до нуля на границі поверхні тертя. Встановлено, що такий профіль має оптимальну маслонесучу здатність і мінімальні витікання мастильного матеріалу.

Постановка завдань. Метою даної роботи є розрахунок зносоконтактних параметрів та моделювання зносу напрямних ковзання з маслоутримувальними канавками змінної глибини трикутного профілю.

Викладення основного матеріалу. Схема утворення канавок конічним індентором та геометричні параметри утворюваного профілю показані на рис. 1. Для аналізу трибологічних напрямних ковзання з маслоутримувальними канавками змінної глибини використаєм залежності для розрахунку геометричних характеристик трикутних канавок, наведених в роботі [12]. Ці залежності адаптуємо для випадку зменшення глибини канавок в результаті лінійного зношування напрямних u_w .

Отже ширина максимальна (в центрі) ширина канавок визначається за залежністю:

$$2a = 2(h_0 - u_w) \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

де h_0 - початкова максимальна глибина канавки; α - напівкут конічного індентора.

Площа канавки на поверхні напрямної розраховується за формулою:

$$A_k(u_w) = 4\sqrt{2R} \cdot \operatorname{tg} \alpha \left[h_0 \sqrt{h_0 - u_w} - \frac{1}{3} (h_0 - u_w) \sqrt{h_0 - u_w} \right], \quad (2)$$

де R - радіус кола обертання індентора при формуванні канавки.

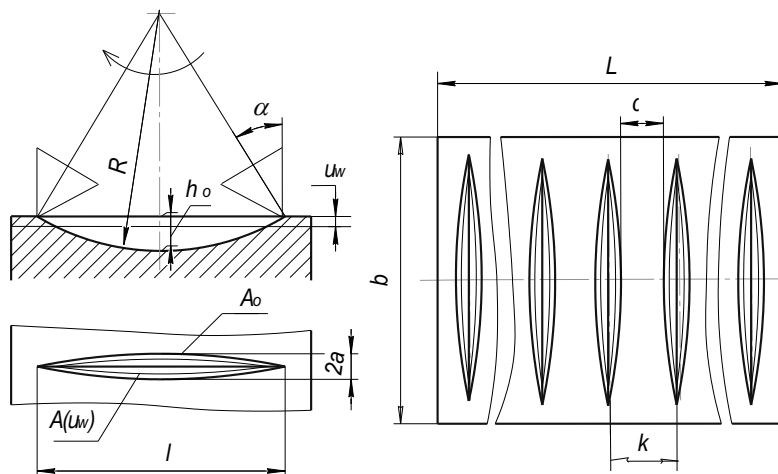


Рис. 1. Форма і граничні розміри канавок (а) та мікропрофіль поверхні (б), утвореної конусним індентором

А сумарна площа несучої поверхні ділянки напрямної з довжиною L та шириною b та кількістю канавок n визначиться:

$$A_r = L \cdot b - n \cdot A(u_w) = L \cdot b - 4n\sqrt{2R} \cdot \operatorname{tg} \alpha \left[h_0 \sqrt{h_0 - u_w} - \frac{1}{3} (h_0 - u_w) \sqrt{h_0 - u_w} \right]. \quad (3)$$

Середній контактний тиск на напрямній при дії на повзун зовнішнього навантаження Q :

$$\sigma_r = \frac{Q}{A_r}. \quad (4)$$

Проведемо тестовий розрахунок параметрів профілю, сформованого конічним індентором з кутом при вершині конуса $\alpha = 60^\circ$ за наступних вихідних даних: $R = 400$ мм; $l = 40$ мм; $h_0 = 0,5$ мм; $L = 120$ мм; $b = 50$ мм; $n = 20$. Трибоконтактні параметри для напрямної з канавками розраховуємо для рівнів зношуванні з кроком $0,1$ мм. Результати розрахунку представлені в таблиці 1 та на рисунку 2.

Геометричні параметри і контактний тиск макропрофілю, сформованого конічним індентором

| Знос u_w , мм | A_k , мм ² | A_r , | | Контактний тиск σ_r , МПа |
|-----------------|-------------------------|-----------------|------|----------------------------------|
| | | мм ² | % | |
| 0 | 47 | 5060 | 84,3 | 0,99 |
| 0,1 | 45 | 5100 | 85,0 | 0,98 |
| 0,2 | 43 | 5140 | 85,6 | 0,97 |
| 0,3 | 37 | 5260 | 87,7 | 0,95 |
| 0,4 | 27 | 5452 | 90,9 | 0,91 |
| 0,5 | 0 | 6000 | 100 | 0,83 |

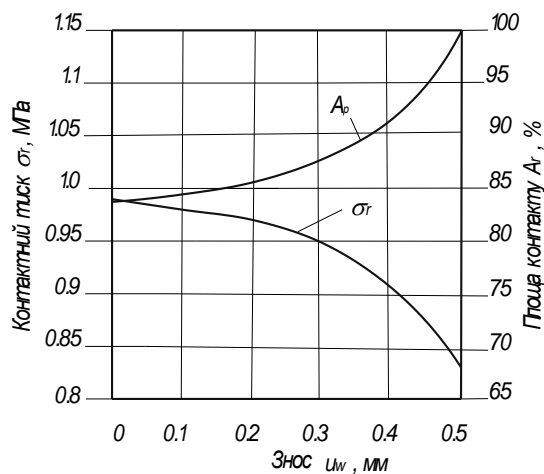


Рис. 2. Залежність площі контакту і контактної тиску від зносу маслостійкого профілю змінної глибини

Для оцінки зносостійкості побудуємо розрахункову модель зношування напрямної ковзання з канавками змінної глибини трикутного профілю. Прийmemo модель зношування напрямної ковзання у вигляді безрозмірних комплексів: контактної тиску і швидкості ковзання у вигляді:

$$I = \frac{du_w}{ds} = c_w \left(\frac{f\sigma}{HB} \right) \left(\frac{Vb}{v} \right), \quad (5)$$

де u_w – нормальний лінійний знос напрямної; s – шлях тертя; f – коефіцієнт тертя в парі повзун-напрямна; σ – нормальний контактний тиск; HB – твердість матеріалу напрямної;

V – швидкість ковзання; b – номінальна ширина напрямної; v – кінематична в'язкість оливи; c_w – коефіцієнт зносостійкості.

З (1) залежність зносу від напівширини канавки з (1) буде:

$$u_w = h_0 - a \cdot \operatorname{ctg} \alpha. \quad (6)$$

Для розрахунку площі канавки скористаємось залежністю [8]:

$$A_k = \frac{8\sqrt{2}}{3} (h_0 - u_w) \operatorname{tg} \alpha \sqrt{R(h_0 - u_w)}. \quad (7)$$

Після підстановки (6) в (7):

$$A_k = \frac{8\sqrt{2}}{3} a \sqrt{aR \operatorname{ctg} \alpha}. \quad (8)$$

Тоді контактний тиск на поверхні напрямної з канавками буде:

$$\sigma = \frac{Q}{Lb - \frac{L}{k} A_k} = \frac{Q}{L} \left(\frac{k}{bk - \frac{8\sqrt{2}}{3} a \sqrt{Rctg\alpha}} \right). \quad (9)$$

Величина зносу u_w та розміри канавки залежать від шляху тертя s , продиференціюємо залежність (6) по шляху тертя:

$$\frac{du_w}{ds} = -ctg\alpha \frac{da}{ds}. \quad (10)$$

Підставимо у модель зношування (5) вирази (9) та (10) та після перетворень отримаємо:

$$\left(\frac{Qc_w k f V b t g \alpha}{L H B v} \right) ds = \left(\frac{8\sqrt{2}}{3} a^{\frac{3}{2}} \sqrt{Rctg\alpha} - bk \right) da. \quad (11)$$

Це звичайне диференціальне рівняння з розділюючимися змінними. Інтегруючи диференціальне рівняння (11) отримаємо:

$$\left(\frac{Qc_w k f V b t g \alpha}{L H B v} \right) s = \frac{16\sqrt{2}}{15} a^{\frac{5}{2}} \sqrt{Rctg\alpha} - abk + C. \quad (12)$$

Постійну інтегрування знайдемо з умови $a(s=0) = a_0$ (початкова напівширина мастильної канавки):

$$C = a_0 bk - \frac{16\sqrt{2}}{15} a_0^{\frac{5}{2}} \sqrt{Rctg\alpha}. \quad (13)$$

З урахуванням $a_0 = h_0 tg\alpha$ та $a = (h_0 - u_w) tg\alpha$ після підстановок у (12) та відповідних алгебраїчних перетворень і спрощень отримаємо вираз для розрахунку зносу напрямної з канавками змінної глибини та трикутного перетину:

$$u_w = \left(\frac{Qc_w k f V b \cdot tg\alpha}{L H B v} \frac{1}{bk - h_0^{\frac{3}{2}} \sqrt{2Rctg\alpha}} \right) s. \quad (14)$$

Для перевірки адекватності отриманої залежності проведемо розрахунок зносу напрямної ковзання наступих вихідних даних:

1. Геометричні розміри напрямної: $l = 500$ мм; $b = 50$ мм;
2. Швидкість ковзання: $V = 20$ мм/с;
3. Кінематична в'язкість оливи Індустріальне И-30: $\nu = 40$ мм²/с;
4. Коефіцієнт тертя в парі повзун-напрямна: $f = 0,1$;
5. Робоче авантаження $Q = 500$ Н;
6. Глибина мастильної канавки $h = 1$ мм, кут профілю канавки $\alpha = 30^\circ$, крок канавок $k = 15$ мм.
7. Твердість матеріалу напрямної НВ=400 МПа.

Параметр зносостійкості c_w в парі чавун-чавун можна прийняти за даними [12]:

$$C_w = 2 \cdot 10^{-8}.$$

Результати чисельного розрахунку лінійного зносу напрямної ковзання наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку зносу напрямної ковзання в залежності від шляху тертя

| Шлях тертя, s , мм | 10^9 | 10^{10} | 10^{11} |
|----------------------------|--------|-----------|-----------|
| Лінійний знос, u_w , мкм | 1,49 | 14,9 | 149 |

Графічна інтерпретація результатів розрахунку зношування напрямної представлена на рис. 3.

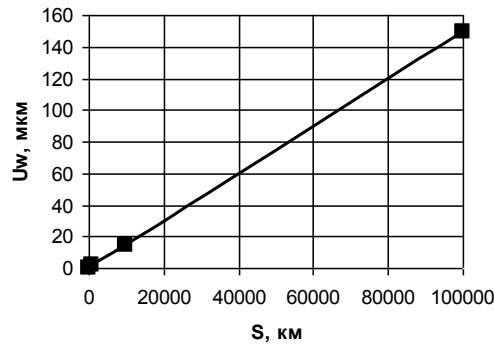


Рис. 3. Залежність зносу напрямної ковзання з трикутним профілем канавок від шляху тертя

Результати розрахунку зносу напрямної ковзання з маслоутримувальними канавками свідчать про достатню адекватність побудованої розрахункової моделі реальним умовам спрацювання напрямних та може бути рекомендована для оцінки впливу конструктивних та технологічних параметрів на зносостійкість напрямних на стадії проектування.

Висновки. Аналіз результатів розрахунку трибоконтактних параметрів напрямної ковзання показує, що при зносі площа контакту збільшується на 34 %, а контактний тиск зменшується на 26%. При зносі профілю з канавками, сформованими конусним індентором, реальна площа контакту збільшується на 18,6%, а контактний тиск зменшується на 16,2%. Інтенсивність зменшення фактичної площі контакту і збільшення контактного тиску суттєво зростає при зношуванні понад 60% повної висоти макропрофілю мастильних канавок.

Список використаних джерел:

1. Лapidус А. С. Направляющие машин. – В кн. Трение, изнашивание и смазка. М.: Машиностроение, 1979. – с. 148 – 173.
2. Решетов Д. В. Детали машин. Машиностроение, 1966. – 655 с.
3. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн.: Кн.2 / Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
4. Детали и механизмы металлорежущих станков. Т.1. / Коллектив авторов под ред. Д. И. Решетова. – М.: Машиностроение, 1972. – 664 с.
5. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
6. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 248 с.: ил.
7. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
8. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов. – К.: Наук. думка, 1984. – 271 с.
9. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник / Л. Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
10. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 248 с.: ил.
11. Чепя П. А. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей / П. А. Чепя, В. А. Андрияшин. – Минск: Наука и техника, 1988. – 192 с.
12. Кузьменко А. Г., Дыха О. В. Контакт, трение и износ смазанных поверхностей: Монография / А. Г. Кузьменко, О. В. Дыха. – Хмельницький: ХНУ, 2007. – 344 с.
13. Дыха О.В. Геометричні параметри і режим тертя в напрямних елементах з маслоутримувальними канавками змінної глибини / О.В. Дыха // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, вип. 39 - Кіровоград: КНТУ, 2009 – С. 378-382.
14. Дыха О.В. Розрахункова оцінка зношування напрямної ковзання з маслоутримувальними канавками трикутного профілю / О.В. Дыха, А.А. Вичавка // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2016. – № 3. – С. 92-97

Рецензенти:

Аулін Віктор Васильович, професор кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький), доктор технічних наук, професор.

Гордєєв Анатолій Іванович, професор кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету, доктор технічних наук, професор.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2017