

*В.М. Бородій, О.О. Скворцов, О.А. Ільїна  
(Національний авіаційний університет, Україна)*

### **Оцінка еластогідродинамічних показників зубчастої передачі героторного масляного насосу**

*Проведено аналіз формування мінімальної товщини мастильного шару в фрикційному контакті зубчастої передачі з урахуванням ЕГД-показників трибоспряження.*

Гідродинамічний режим мащення характеризується конформними поверхнями, які досить добре прилягають, забезпечуючи розподіл навантаження в фрикційному контакті по відносно великій площі. Існує багато елементів машин, що належать до неконформних вузлів, у яких контактні поверхні не дуже добре прилягають одна до одної. Тоді все навантаження локалізується по дуже незначній площі контакту. Деякими прикладами цих невідповідних поверхонь є спряжені зуб'я шестерні, кулачки/пальці, а також підшипники кочення.

Передача потужності в зазначених елементах машин та механізмів, зазвичай здійснюється за допомогою зосереджених контактів кочення і кочення-ковзання, в яких контактні поверхні тертя локально пружно деформуються під дією контактних сил [1]. Для сухих контактів відповідні деформації, тиск та напруження можуть бути апроксимовані теорією Герца. У присутності достатньої кількості мастильного матеріалу створюється гідродинамічний тиск, і поверхні, що контактують, хоча б частково розділяються тонкою плівкою рідини [2]. Якщо локальна пружна деформація і товщина плівки мастильного матеріалу мають однаковий порядок величини, такий стан зазвичай називають еластогідродинамічним мащенням (ЕГД) або термоеластогідродинамічним мащенням (ТЕГД), коли враховуються також теплові ефекти.

Актуальним напрямком надійного прогнозування довговічності неконформних вузлів і оптимального вибору мастильних матеріалів є розробка комплексної методики оцінки триботехнічних характеристик мастильних матеріалів в умовах рясного мащення і масляного голодування, що дає можливість розробити рекомендації щодо забезпечення раціонального режиму мащення трибовузла, правильного вибору мастильного матеріалу та температурного режиму його експлуатації та оцінити знос і ресурс елементів трибоспряження.

Моделювання контактів ЕГД зазвичай проводиться шляхом застосування рівняння Рейнольдса [3] для гідродинаміки та розв'язання системи рівнянь у поєднанні з пружною деформацією. Для цієї мети використовуються багаторівневі методи інтегрування, засновані на підходах кінцевих різниць та ітераційного поєднання з теорією пружного напівпростору [4]. Схематичне уявлення нескінченного лінійного контакту ЕГД із загальними вхідними змінними показано на рис. 1.

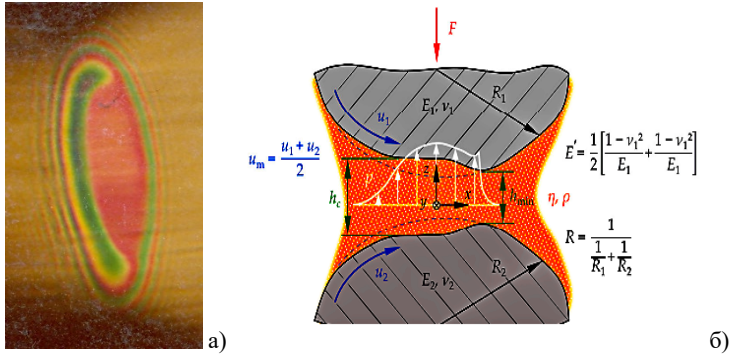


Рис. 1. Розподіл товщини мастильного шару (а) та схематичне зображення лінійного ЕГД-контакту із відповідними змінними для чисельних розрахунків (б).

Мета роботи – оцінка мінімальної товщини мастильного шару зубчастої передачі героторного масляного насоса з урахуванням ЕГД-показників трибоспряження.

Головний напрям вирішення ЕГД-задачі триботехнічного контакту полягає в визначенні мінімальної товщини мастильного шару з достатньо високою імовірністю. За товщиною мастильного шару можна встановити режим мащення від граничного до гідродинамічного (від рясного мащення до мастильного голодування), структуру і умови переходу. Шляхом порівняння отриманої величини товщини мастильного шару з експлуатаційною шорткстією контактних поверхонь можна встановити критерії прогнозування довговічності вузлів тертя, а також здійснювати оптимальний вибір мастильних матеріалів.

На підставі теорії подібності можна встановити три безрозмірні параметра, залежно від яких визначається відносна товщина мастильного шару:

$$\bar{H} = f(\bar{W}; \bar{U}; \bar{G}), \quad (1)$$

де  $\hat{H}$  – параметр товщини мастильного шару:  $\hat{H} = h/R$ , ( $h$  – товщина мастильного шару в контакті [м],  $R$  – еквівалентний радіус кривизни контактних поверхонь [м]);  $\bar{W}$  – параметр навантаження:  $\bar{W} = W/(E \cdot R)$ , ( $W$  – навантаження на контакт [Н/м],  $E$  – еквівалентний модуль пружності матеріалів контактних поверхонь [Па]);  $\bar{U}$  – параметр швидкості:  $\bar{U} = (\eta_0 \cdot V)/(E \cdot R)$ , ( $\eta_0$  – динамічна в'язкість мастильного матеріалу [Па·с],  $V$  – швидкість контактних поверхонь [м/с]);  $\bar{G}$  – параметр матеріалу:  $\bar{G} = \alpha \cdot E$ , ( $\alpha$  – п'єзокоєфіцієнт в'язкості [Па<sup>-1</sup>]).

В якості об'єкту дослідження та розробки методики розрахунку обраний героторний насос із позациентроїдним епіциклоїдальним зачепленням з  $z$ -числом зубів шестерні (внутрішнього ротора), де  $z$  становило 4, 6 та 8. Потужність героторного насоса – 10 кВт, продуктивність – 16 л/хв, максимальний крутний момент на роторі насосу – 500 Н·м, тиск робочої

рідини - 10 МПа, діаметр вала - 25 мм, номінальний діаметр вісі шестерні ротора - 100 мм, максимальна кількість обертів – 1300 об/хв. Проведена оцінка ЕГД-параметрів контакту для моторних олів Агрінол SAE 5W-30, Агрінол SAE 5W-40 та Agrinol Professional SAE 15W-40.

На основі експериментальних даних щодо формування товщини мастильного шару даними оливами в умовах кочення з проковзуванням 20 %, одержана емпірична залежність мінімальної товщини мастильного шару від динамічної в'язкості мастильного матеріалу ( $\eta_0$ ), швидкості обертання вала ( $V$ ), приведенного радіусу кривизни поверхонь ( $\rho_{np}$ ), максимального контактного напруження по Герцу ( $\sigma_{max}$ ), п'єзокоефіцієнту мастильного матеріалу ( $a$ ):

$$h = 0,768 \frac{(\eta_0 V)^{0,625} (100 \rho_{np})^{0,375} \sigma_{max}^{0,125}}{a^{0,5}} \text{ [мкм]}. \quad (2)$$

З урахуванням безрозмірних параметрів ЕГД-контакту мінімальна товщина мастильного шару в лінійному контакті визначається за наступною формулою (табл.1, 2):

$$H_{min} = 3,63 \cdot 10^6 \cdot U^{0,5} \cdot G^{0,5} \cdot W^{-0,073} \cdot Z \cdot R_{np}, \text{ [мкм]} \quad (3)$$

де  $U$  – безрозмірний параметр швидкості;  $G$  – безрозмірний параметр матеріалу;  $W$  – безрозмірний параметр навантаження;  $Z$  – параметр мікрогеометрії контактних поверхонь;  $R_{np}$  – приведений радіус кривизни контактних поверхонь.

Таблиця 1.

Типові діапазони для безрозмірних параметрів ЕГД-контакту зуб'їв героторного насосу із позациентроїдним епіциклоїдальним зачепленням

№	Характеристика	Значення
1	Безрозмірний параметр матеріалу	$10^5 - 10^7$
2	Безрозмірний параметр швидкості	$10^{-19} - 10^{-13}$
3	Безрозмірний параметр навантаження	0,1 – 0,5
4	Мінімальна товщина мастильного шару, мкм	$10^{-2} - 7$

Таблиця 2.

Безрозмірні параметри ЕГД-контакту зуб'їв героторного насосу при контактному навантаженні 400 МПа

Кількість обертів, об/хв	Число зуб'їв шестерні (внутрішнього ротора)		
	4	6	8
300	$U = 7,1 \cdot 10^{-15}$ $G = 175935$ $H_{min} = 1,3$ $I = 1,6 \cdot 10^{-10}$	$U = 1,5 \cdot 10^{-14}$ $G = 266944$ $H_{min} = 2,7$ $I = 3,3 \cdot 10^{-12}$	$U = 9,36 \cdot 10^{-14}$ $G = 179913$ $H_{min} = 5,7$ $I = 5,8 \cdot 10^{-13}$

Формування товщини мастильного шару в ЕГД-контакті обумовлює домінування різних режимів мащення – від напівсухого до еластогідродинамічного, що впливає на зносостійкість контактних поверхонь.

Таким чином, визначення безрозмірних параметрів ЕГД-контакту зубів героторного насосу із позациентроїдним епіциклоїдальним зачепленням дозволяє спрогнозувати домінуючий режим мащення в фрикційному контакті та спрогнозувати інтенсивність зношування елементів трибоспряження в експлуатаційних умовах.

### Список літератури

1. Hartinger M., Dumont M.-L., Ioannides S. and others. CFD Modeling of a Thermal and Shear-Thinning Elastohydrodynamic Line Contact / J. Tribol. 2008. – 130. – P. 41503–4150316.
2. Greenwood, J.A. Elastohydrodynamic Lubrication / Lubricants. – 2020. - 8. – 51 (P.30)
3. Reynolds O. On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil / Philos. Trans. R. Soc. Lond. – 1886. – 177. – P. 157–234..
4. Habchi W., Demirci I. Eyheramendy D. A finite element approach of thin film lubrication in circular EHD contacts / Tribol. Int. – 2007. – 40. - P. 1466–1473.