

# Прикладна гідромеханіка, гідромашини і гідропневмоагрегати

УДК 621.646.4

О.М. Яхно, д-р техн. наук,

С.В. Струтинський, канд. техн. наук

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ТЕНЗОРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНІЗОТРОПІЇ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕЧІЇ МАСТИЛА В ЩІЛИНІ СФЕРИЧНОГО ШАРНІРА, ВИГОТОВЛЕНого З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ЛАЗЕРНОЇ СТЕРЕОЛІТОГРАФІЇ

Представлены разработанные конструкции сферических шарниров, детали которых изготовлены методом лазерной стереолитографии. Дан анализ возможностей метода и положительные результаты использования деталей, изготовленных методом лазерной стереолитографии. Определены параметры микрогеометрии деталей, использованных в парах жидкостного трения. На упрощенных моделях исследовался механизм изменения гидродинамических характеристик течения в слое смазки, обусловленный анизотропией микропрофиля поверхности. Определены тензорные характеристики течения смазки, учитывающие анизотропию микропрофиля поверхности трения.

The developed design of spherical joints, the details of which are prepared by laser stereolithography. An analysis of the method and the positive results of using parts produced by laser stereolithography. The parameters of the microgeometry of parts used in fluid friction pairs. The simplified model the mechanism of change of the hydrodynamic characteristics of the flow in the lubricating film due to anisotropy microprofile surface. Defined tensor characteristics of lubricant flow, taking into account the anisotropy of the friction surface microprofile.

### Вступ

Технологічне обладнання на основі просторових механізмів є новим і перспективним напрямом машинобудування. Розвиток технологічного обладнання стимується відсутністю елементної бази, основними складовими якої є сферичні шарніри просторових механізмів. Тому дослідження, які направлено на створення нових конструкцій шарнірів, є актуальними.

Проблема в загальному вигляді полягає у розробці сферичних шарнірів із високими показниками точності та надійності роботи і пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями розвитку перспективного технологічного обладнання.

В останніх дослідженнях і публікаціях наведено низку конструкцій сферичних шарнірів для просторових механізмів [1]. В основному розглядаються шарніри на опорах кочення [2]. Чимало робіт присвячено розробці та дослідженю гідростатичних та аеростатичних сферичних шарнірів [3,4]. Застосування комп'ютерно інтегрованих технологій при виготовленні сферичних шарнірів та результатів досліджень таких шарнірів у літературних джерелах не виявлено.

До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься застосування комп'ютерно інтегрованих технологій в сферичних шарнірах, зокрема, застосування методів лазерної стереолітографії. Одержані деталі сферичних шарнірів мають особливі властивості пар рідинного тертя.

У шарі мастіла має місце відмінність гідродинамічних характеристик в залежності від напряму течії мастіла. Гідродинамічні характеристики описуються в термінах тензорного поля.

### Мета дослідження

Метою досліджень є визначення тензорних характеристик анізотропії гідродинамічних параметрів течії мастіла в щілині сферичного шарніра, виготовленого з використанням методів лазерної стереолітографії.

Задачами досліджень є підтвердження можливості застосування методів лазерної стереолітографії при виготовленні деталей сферичних шарнірів, визначення параметрів геометрії поверхонь тертя, встановлення особливостей течії мастіла в щілині шарніра та визначення тензорних характеристик анізотропії течії мастіла в щілині шарніра, виготовленого з використанням методів лазерної стереолітографії.

### Виклад основного матеріалу

Сферичні шарніри є основними вузлами просторової системи приводів. Типова конструкція сферичного шарніра включає рухому сферу 1 із хвостовиком 2, який зв'язано із ланкою просторової системи приводів (рисунок 1, а). У корпусі шарніра 3 встановлено опорні елементи 4, які мають сферичні поверхні 5, що взаємодіють із сферою 1. Опорні елементи виготовлено методом лазерної стереолітографії. Виготовлення деталей здійснено на

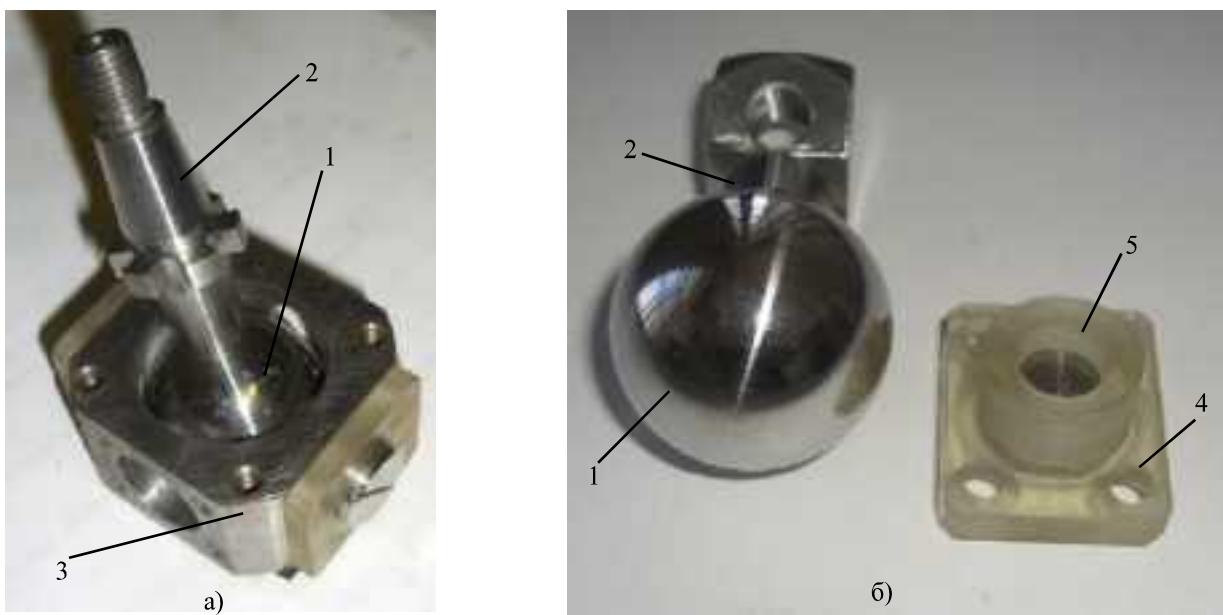


Рисунок 1— Сферичний шарнір просторової системи приводів, виготовлений з використанням методів лазерної стереолітографії: а) шарнір в зборі; б) основні деталі шарніра

спеціальному обладнанні (3D принтер) по твердотільній моделі деталі [5]. Твердотільна модель опорного елемента розроблена в системі Inventor.

У твердотільній моделі деталі використовуються різноманітні просторові поверхні. Зокрема це поверхні у вигляді ділянки сфери, циліндра, тора, конуса та інші. При проектуванні деталей необхідно, по можливості, вводити плоскі поверхні, паралельні базі. Застосовуються циліндричні поверхні різного виду, це необов'язково круговий циліндр. Твірну циліндричної поверхні обирають у вигляді кривої, паралельній базі.

Розроблена деталь (опорний елемент шарніра) має плоскі, циліндричні, сферичні, та фасонні поверхні (див. рисунок 1, б). До фасонних поверхонь відноситься різьба M10x1, яку виконано на внутрішній поверхні отвору.

Для формування різі вона задається у вигляді точної математичної моделі поверхні, що визначає виступи і канавки. Обов'язково визначаються скруглення і переходи.

Опорні елементи сферичного шарніра виготовлено із твердого полімерного матеріалу FullCure720. Він має межу міцності на розрив 60,3 МПа, межу міцності на стиск — 84,3 МПа, модуль пружності 2870 МПа.

Деталі із такого матеріалу (фотополімер) допускають діапазон робочих температур до 60–70°C. Сформована поверхня добре обробляється різанням має низький коефіцієнт тертя та високі антизадирні властивості. Допускається зварювання деталі або клеєві з'єднання. Матеріал є хімічно неактивним. Можлива термообробка, загартування з нагріванням деталі до 120–140°C та подальшим охолодженням.

У деталях, виготовлених методом лазерної стереолітографії, можна виконати розгалужену систему отворів довільної форми. Осі отворів виконуються як прямими, так і криволінійними. Допускається різноманітне спряження осей отворів. Мінімальний діаметральний розмір отворів

обмежується необхідністю видалення залишків фотополімера. Це здійснюється при промивці деталі після її формування.

Рекомендуються мінімальні розміри отворів 1–2 мм. Форма перетину отворів не обмежується. Для гідравлічних комунікацій рекомендуються кругові та еліптичні перетини отворів, а також отвори у вигляді прямокутників або ромбів із заокругленими краями. При визначенні розташування отворів необхідно врахувати напрямок виступів та канавок на сформованій поверхні отвору, які обумовлені пошаровим нанесенням полімеру при формуванні деталі.

Можливість формування системи отворів із необхідною формою стінок та необхідним поперечним перетином є унікальною властивістю методів лазерної стереолітографії. Це дозволяє реалізувати принципово нові системи гіdraulіки і пневматики. Наявна можливість виконання гідропневмосистем із ламінарізованим або безвідривним рухом рідкого середовища. У таких системах доцільно застосовувати методи струменевого регулювання параметрів потоку.

Великі можливості наявні в реалізації задач керуванняграничними шарами на стінках трубопроводів, вплив на формування та регулювання параметрів відривних областей при інерційному та в'язкому відриві потоків. Принципово нові можливості виникають при вирішенні задач злиття та розділення потоків рідини, формуванні циркуляційних та вихрових областей. Широкі можливості керування параметрами турбулентності дає виконання спеціального мікро- і макрорельєфу на стінках трубопроводів, введенням спеціальних конфузорних і дифузорних ділянок для керування інтенсивністю турбулентності.

У системі гідролічних комунікацій можна реалізувати систему порожнин, з'єднаних із гідросистемою спеціальними каналами. Використання таких порожнин є ос-

новою керування динамічними процесами в гідросистемі. Зокрема, їх можна використовувати для згладження пульсацій тиску, зменшення інтенсивності акустичних процесів у гідросистемі. В каналах можуть бути реалізовані стінки, перемички, виступи для формування необхідних характеристик течії. Зокрема, пористі перемички або перемички із системою малорозмірних отворів застосовуються для керування параметрами граничного шару шляхом вдуву або відсмоктування рідкого середовища із граничного шару. Даним методом можна забезпечити керування відливом потоку від стінки, його турбулізацію або ламінарізацію. В трубопроводах може бути сформовано вторинні течії з метою формування спеціальних гідралічних характеристик трубопроводів.

Деталі, які виготовлено із фотополімера, мають достатню точність за високої якості поверхні. Використання деталей, виготовлених методом лазерної стереолітографії дало можливість суттєвим чином вдосконалити конструкцію сферичних шарнірів.

### Геометричні характеристики поверхонь деталей, виготовлених методом лазерної стереолітографії

Технологія лазерної стереолітографії полягає у пошаровому затверджені фотополімера під дією лазерного променя. При цьому промінь лазера здійснює скануючі рухи відносно деталі у напрямі  $U$  (рисунок 2).

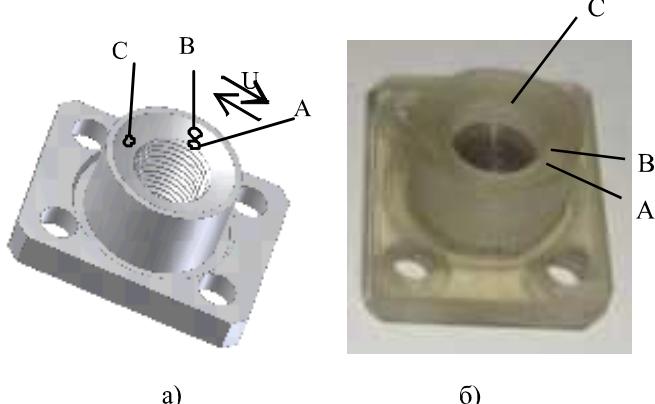


Рисунок 2 — Твердотільна модель опорного елемента (а) та фото опорного елемента, виготовленого методом лазерної стереолітографії (б).

Внаслідок поступального переміщення променя лазера на сферичній поверхні формуються різновідні ділянки. На ділянці А формуються поздовжні бороздки на сферичній поверхні, яка має незначні відхилення висоти. На ділянці В наявний суттєвий перепад висот при переміщенні лазерного променя. На ділянці С формуються правильні поздовжні риски.

Робоча ділянка сферичного шарніра із фотополімера має нерівну поверхню, на якій спостерігаються напливи хаотичного характеру. На ділянках А і В, спостерігаються випадкові нерівності (рисунок 3).

На сферичній поверхні наявна система мікрорисок. Вони загалом орієнтовані в напрямках близьких до напрямку переміщення лазерного променя  $U$ . На поверхні простежуються локальні області ( $D_1 - D_4$ ), в яких напрями мікрорисок носять хаотичний характер.

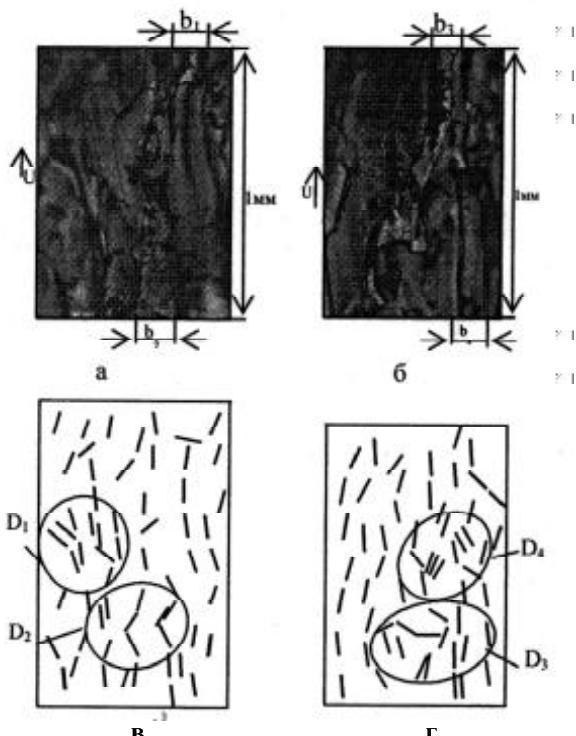


Рисунок 3 — Поверхня сферичного шарніра із фотополімера, на якій простежуються напливи хаотичного характеру (збільшено в 100 разів):  
а — фото ділянки А; б — фото ділянки В;  
в — мікрориски, відповідні ділянці А; г — мікрориски відповідні ділянці Б.

Кількість і площа таких областей є незначною. Особливості поверхні в локальних областях пояснюються кривизною поверхні та випадковими факторами, які мали місце в процесі виготовлення деталей. Відстань між мікрорисками близька до деякого середнього значення і складає:

$$b_1 \approx b_2 \approx b_3 \approx b_4 \approx 0,01-0,014 \text{ мм.}$$

На ділянці поверхні, де промінь лазера рухається в радіальному до оброблюваної сферичної поверхні напрямку (ділянка С на рисунку 2) виступи мають більш рівномірний характер (рисунок 4)

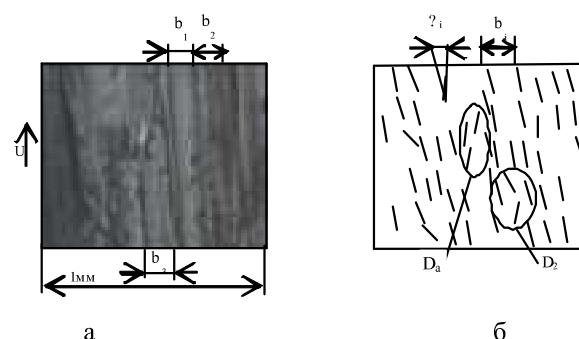


Рисунок 4 — Сферична поверхня на ділянці С, де промінь лазера переміщувався по радіусу сфери:  
а — фото ділянки (збільшено в 100 разів);  
б — мікрориски на поверхні відповідні фото

Для даної ділянки риски орієнтовані в напрямку близькому до напряму руху лазерного променя. Напрями мікрорисок близькі між собою. У результаті аналізу фото різних ділянок та відповідних їм масивів мікрорисок встановлено, що сферична поверхня в різних радіальних площинах має однакову загальну орієнтацію мікрорисок відповідну напряму руху лазерного проміння. Спостерігаються невеликі відхилення мікрорисок від основного напряму та обмежені області  $D_1, D_2$  з хаотичним розташуванням мікрорисок.

Для визначення закономірностей розташування мікрорисок проведена статистична обробка їх фактичного положення. По масивам рисок відповідних різним фото побудована гістограма частоти наявності рисок відповідного напряму (рисунок 5, а)

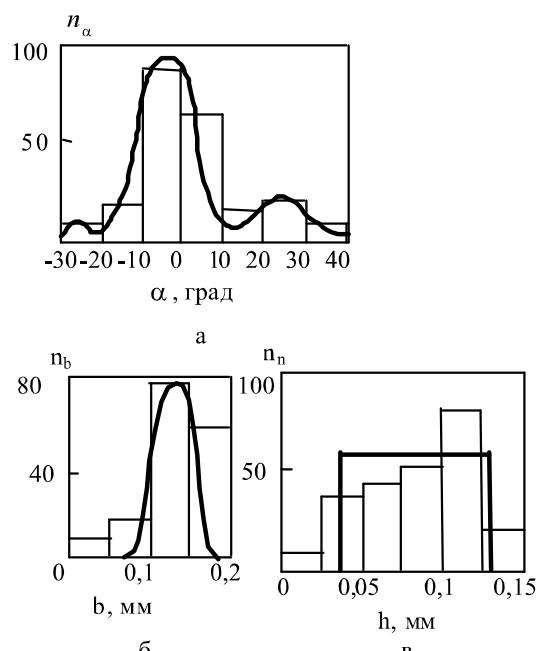


Рисунок 5 — Гістограми частоти кутів розташування мікрорисок (а), відстаней між паралельними мікрорисками (б), та висоти виступів (в).

В основному риски орієнтовані в межах кута  $-10$  до  $+5^\circ$  відносно напряму руху лазерного променя.

Відстань між паралельними рисками відображає наявність регулярної системи канавок на поверхні. Ширина канавок змінюється в діапазоні  $0,05\text{--}0,2\text{ мм}$  (рисунок 5, б). У середньому ширина канавок відповідає ширині виступа і складає  $0,1\text{--}0,15\text{ мм}$ .

Дослідження доповнено вимірами глибини канавок (висоти виступів). Глибина канавок змінюється у діапазоні  $0,025\text{--}0,15\text{ мм}$ . Встановлено, що глибина канавок змінюється випадковим чином із законом розподілу, близьким до рівномірного у межах  $0,04\text{--}0,13\text{ мм}$  (рисунок 5, в).

Проведено виміри профілограм сферичної поверхні виготовленої методом лазерної стереолітографії. Виміри профілограм здійснено у двох взаємно перпендикулярних напрямах (рисунок 6).

В результаті аналізу профілограм встановлено, що на обробленій поверхні із фотополімеру наявна система канавок неправильної форми. Після доводочної операції вершини канавок згладжуються і становляться плоскими. Поверхня набуває вигляду плоских протяжних виступів між якими наявні канавки (рисунок 6, в).

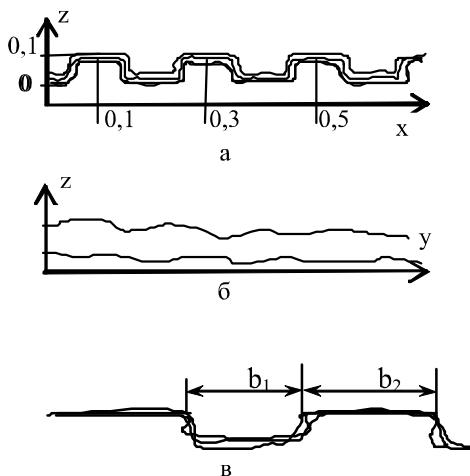


Рисунок 6 — Профілограми поверхні виготовленої методом лазерної стереолітографії: а — у напрямі, перпендикулярному канавкам; б — у напрямі, близькому до напряму канавок на поверхні; в — профілограма поверхні після доводочої операції.

Закономірності течії масла в щілині, поверхня якої утворена деталлю, виготовленою методом лазерної літографії. За наявності регулярної системи канавок і виступів на поверхні щілина має особливі гіdraulічні характеристики. Розглянемо ідеалізовану схему канавок на поверхні стінки щілини (рисунок 7).

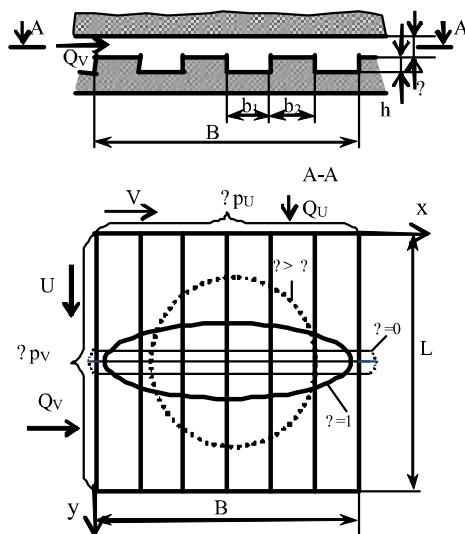


Рисунок 7 — Спрощена схема щілини з канавками прямоокутного перетину.

Наявність канавок обумовлює різницю гіdraulічних характеристик щілини при течії рідини в різних напрямках. Плоска щілина, через яку спливає рідина, має лінійну гіdraulічну характеристику у вигляді залежності витрати  $Q$  від перепаду тиску  $\Delta p$  [6].

$$Q = \frac{bs^3}{12\mu L} \Delta p, \quad (1)$$

де  $b$  – розмір щілини в напрямку, перпендикулярному потоку рідини;  $s$  – ширина щілини;  $\mu$  – динамічна в'язкість рідини;  $L$  – довжина щілини.

Для ідеалізованої схеми щілини у вигляді набору плоских площинок  $b_1$ , загальна витрата складатиметься із суми витрат через ділянки щілини завширшки  $\delta$  і ділянки щілини завширшки  $\delta + h$ .

Приймемо загальний розмір щілини у напрямі, перпендикулярному потоку, таким, що дорівнює довжині щілини  $B=L$ , а розмір  $B$  є кратним кроку виступів. Тоді кількість пар виступів і впадин складатиме

$$n = \frac{B}{b_1 + b_2} = \frac{L}{b_1 + b_2}.$$

Прийнявши  $n$  як деяке ціле додатне число, одержимо

$$L = B = n(b_1 + b_2).$$

Витрата рідини  $Q_U$  при течії рідини в щілині вздовж канавок визначиться залежністю (1), записаної для всіх ділянок  $b_1$  та  $b_2$  і складе

$$Q_U = \left[ \frac{b_1 \delta^3 + b_2 (\delta + h)^3}{12\mu (b_1 + b_2)} \right] \Delta p_U,$$

де  $\Delta p_U$  – перепад тиску на довжині щілини  $L$ .

Визначимо гіdraulічний опір щілини у напрямі  $U$ :

$$R_U = \frac{\Delta p_U}{Q_U} = \frac{12\mu (b_1 + b_2)}{b_1 \delta^3 + b_2 (\delta + h)^3}. \quad (2)$$

Гіdraulічна характеристика щілини у напрямі  $V$  під дією перепаду тиску  $\Delta p_V$  визначиться з рівняння тисків

$$\Delta p_V = n(\Delta p_1 + \Delta p_2), \quad (3)$$

де  $\Delta p_1, \Delta p_2$  – перепади тиску відповідно на ділянках щілини  $b_1$  та  $b_2$ .

Вони визначаються залежностями:

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= Q_V \frac{12\mu b_1}{n(b_1 + b_2) \delta^3}, \\ \Delta p_2 &= Q_V \frac{12\mu b_2}{n(b_1 + b_2) (\delta + h)^3}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $Q_V$  – витрата при течії рідини у напрямі  $V$ .

Об'єднавши формули (3), (4), одержимо гіdraulічну характеристику щілини у напрямі  $V$  у вигляді:

$$\Delta p_V = Q_V \frac{12\mu}{(b_1 + b_2)} \left[ \frac{b_1}{\delta^3} + \frac{b_2}{(\delta + h)^3} \right] = R_V Q_V. \quad (5)$$

Гіdraulічний опір щілини  $R_V$  у напрямі  $V$  складає:

$$R_V = \frac{12\mu}{b_1 + b_2} \left[ \frac{b_1}{\delta^3} + \frac{b_2}{(\delta + h)^3} \right]. \quad (6)$$

Складемо відношення гіdraulічних опорів щілини у напрямах  $U$  і  $V$ . З метою спрощення покладемо  $b_1 = b_2$ . Відповідно використавши (2) і (6), одержимо:

$$\begin{aligned} \rho_{UV} &= \frac{R_U}{R_V} = \\ &= \frac{1}{[\delta^3 + (\delta + h)^3] \left[ \frac{1}{\delta^3} + \frac{1}{(\delta + h)^3} \right]} \\ &= \frac{4\delta^3(\delta + h)^3}{[\delta^3 + (\delta + h)^3]^2} \end{aligned} \quad (7)$$

В формулі (7) введемо відносну ширину щілини  $\Delta = \delta/h$ . При цьому відношення гіdraulічних опорів у перпендикулярних напрямах  $U$  і  $V$  складає:

$$\rho_{UV} = \frac{R_U}{R_V} = \frac{4\Delta^3(\Delta + 1)^3}{[\Delta^3 + (\Delta + 1)^3]^2} \quad (8)$$

При відносній ширині  $\Delta = 1$  ( $\delta = h$ ) відношення гіdraulічних опорів  $\rho_{UV} \approx 0.4$ . У випадку, коли зазор  $\delta \rightarrow 0$  ( $\Delta \rightarrow 0$ ) відношення гіdraulічних опорів  $\rho_{UV} \rightarrow \infty$ . Коли зазор  $\delta$  завеликий  $\delta \rightarrow \infty$ , відношення опорів  $\rho_{UV} = 1$ .

Формула (8) визначає суттєво нелінійну залежність відношення опорів від ширини щілини (рисунок 8):

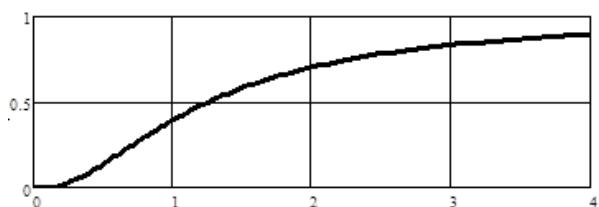


Рисунок 8 – Залежність відношення гіdraulічних опорів щілини у двох взаємноперпендикулярних напрямках від ширини щілини.

Із проведених досліджень випливає, що при ширині щілини близькій до висоти нерівностей  $\delta \approx h$ , відношення гіdraulічних опорів у двох взаємноперпендикулярних напрямках суттєво відрізняється від одиниці. Це означає, що гіdraulічний опір щілини залежить від напряму руху рідини через анізотропію властивостей поверхні щілини.

#### Тензорні характеристики анізотропії гідродинамічних параметрів течії в щілини

Рівняння повільного руху рідини в щілині із врахуванням анізотропії гідродинамічних параметрів по площині щілини визначено у вигляді [7]:

$$\mu \Delta \vec{w} = \nabla p - \mu G \vec{w}, \quad (9)$$

де  $w$  — швидкість рідини в щілині;  $\Delta$  — оператор Лапласа (лапсасіан);  $\nabla$  — диференціальний оператор (Набла);  $G$  — тензор проникності середовища.

Рівняння (9) визначає повільний рух рідини в щілині. Воно являє собою тензорний вигляд закону Дарсі. Рівняння враховує відмінність коефіцієнтів опору щілини при течії в різних напрямках. Для течії рідини через щілину маємо фізичну причину зміни гідравлічного опору або проникності середовища у вигляді наявних канавок на поверхні стінок щілини.

Якщо середовище анізотропне, то вектор середньої швидкості  $\vec{w}$  не буде співпадати по напрямку з вектором градієнту тиску.

В анізотропній щілині вектор середньої швидкості по'язано із градієнтом тиску. В проекціях на осі координат  $x_1, x_2$  маємо співвідношення:

$$w_i = \sum_{j=1}^2 g_{ij} \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (10)$$

Введений набір величин  $g_1, g_2$  утворює тензор проникності щілини

$$G = (g_{ij}) = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

В загальному випадку тензор проникності є неособливим (невиродженим). Випадок виродженого тензора проникності означає, що в деякому напрямку відсутній рух рідини [8].

Приймемо, що тензор проникності є симетричним. Приведемо його до головних напрямків, які відповідають головним координатам  $X_1, X_2$ :

$$G = (g_{ij}) = \begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix},$$

де  $G_1, G_2$  — головні значення тензора проникності, які відповідають головним напрямкам тензора проникності.

Тензор  $(r_{ij})$ , обернений тензору  $(g_{ij})$ , називається тензором гідравлічного опору щілини. Розв'язавши тензорне рівняння (10) відносно компонент вектора градієнта тиску, одержимо

$$\frac{\partial p}{\partial x_j} = \sum_{i=1}^2 r_{ij} w_i$$

де  $r_{ij}$  — компоненти тензора гідравлічного опору щілини. Тензор гідравлічного опору в довільній системі координат  $x_1, x_2$  визначено матрицею:

$$R = (r_{ij}) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Тензор  $(r_{ij})$  також є симетричним. Одночасно з тензором проникності до діагонального виду приводиться і матриця тензора гідравлічного опору щілини.

Головні значення тензора гідравлічного опору:

$$R_1 = \frac{1}{G_1}, R_2 = \frac{1}{G_2}.$$

При виборі головних напрямів  $X_1 = x$ ,  $X_2 = y$ , відповідних напрямам  $U$  і  $V$  (рисунок 7) власні значення тензора відповідатимуть визначенням раніше гідравлічним опором щілини в двох взаємноперпендикулярних напрямках  $R_1 = R_U, R_2 = R_V$ .

Для тензора (12) визначено тензорну поверхню у вигляді еліпса. Головні значення тензора відповідають на півсям еліпса.

Для щілини шарніра тензорний еліпс гідравлічного опору орієнтовано по напрямку канавок. Менша півось еліпса направлена вздовж канавок, а більша — поперек канавок. Величина напівосей еліпса залежить від змін ширини щілини (рисунок 7). В ідеальному випадку, коли ширина щілини зменшується до нуля ( $\Delta=0$ ), еліпс вироджується в дві паралельні лінії.

Визначений тензор гідравлічного опору щілини послужив основовою для визначення розподілу тиску по площині щілини сферичного шарніра (рисунок 9)

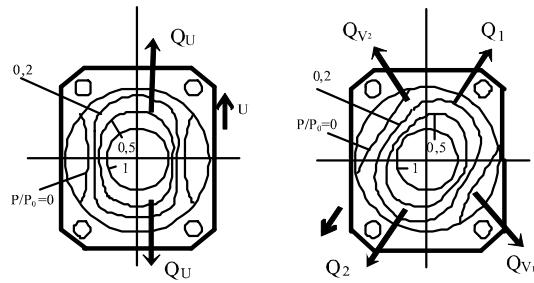


Рисунок 9 — Ізобари в шарі мастила по поверхні щілини сферичного шарніра: а — при симетричній посадці сфери на сідло; б — при нерівномірному зазорі між сферою і сідлом

Анізотропія гідравлічних характеристик щілини приводить до суттєвих змін розподілу тиску в шарі мастила. Ізобари набувають характерної (сплюснутої) форми (рисунок 9, а). Для ізотропної в гідравлічному відношенні щілини ізобари мають вигляд концентричних кіл. Наявність анізотропії гідравлічних характеристик призводить до зосередження течії рідини у напрямі канавок. Formуються різнонаправлені потоки рідини  $Q_U$ , орієнтовані у напрямку канавок  $U$  на поверхні щілини.

При зміні розмірів щілини через переміщення сфери напрями основних потоків дещо змінюються (рисунок 9, б). Потоки в перпендикулярних напрямках є мало інтенсивними. Наявність анізотропії гідравлічних характеристик щілини суттєво поліпшує трибологічні характеристики шарніра по умовам змащення та забезпечують видалення продуктів зносу із щілини.

### Висновки

Доведено, що методи лазерної стереолітографії можуть бути ефективно використані при виготовленні сферичних шарнірів просторових механізмів.

Сферичні опорні поверхні, які виготовлено із фотополімера, мають систему регулярних канавок і виступів завширшки 0,1–0,15 мм і глибиною 0,05–0,01 мм, які після доводочої операції набувають форми плоских площинок, орієнтованих у напрямі руху лазерного променя, який мав місце при виготовленні деталі.

Наявність системи канавок призводить до суттєвої різниці гідравлічного опору щілини сферичного шарніра при течії рідини у різних напрямах. Опір при течії вздовж канавок в 2–10 разів менше, ніж при течії в перпендикулярному напрямі.

Наявність системи канавок на стінках щілини обумовлює тензорні характеристики гідродинамічних параметрів у вигляді тензора проникності щілини та оберненого йому тензора гідравлічного опору щілини. Тензорний характер гідравлічних характеристик враховує анізотропію властивостей щілини, яка полягає у нерівномірному по поверхні сфери розподілу тиску та нерівномірній витраті рідини у радіальних напрямах.

Для подальших досліджень рекомендується дослідження експлуатаційних характеристик сферичного шарніра, деталі якого виготовлено методом лазерної стереолітографії.

### Література

1. Крижанівський, В.А., Кузнєцов, Ю.М., Валявський, І.А., Скліров, Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ / Під ред. Ю.М. Кузнєцова. — Кіровоград, 2004. — 449 с.
2. Бушуев, В.В. Практика конструирования машин: Справочник. — М.: Машиностроение, 2006. — 448с.
3. Струтинський, С.В. Експериментальні дослідження реальної геометричної форми сферичних поверхонь гідростатично-аеростатичного опорного вузла // Технологія і техніка друкарства. — 2008. — №1. — С.68—77.
4. Струтинський, С.В. Наукові основи розробки регульованих сферичних опор рідинного тертя для просторових механізмів / С.В. Струтинський // Вісник Національного техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут”, серія Машинобудування. — 2010 — №58. — С. 273—281.
5. Грабченко, А.И., Добросок, В.Л., Чернышов, С.И., Гаращенко, Я.Н. Систематика интегрированных генеративных технологий формообразования // Сучасні технології в машинобудуванні: Збірник наукових статей / За заг. ред. А.І. Грабченка.— Том.1.— Харків: НТУ “ХПІ”, 2006. — С. 312—342..
6. Струтинський, С.В. Теоретичні дослідження гідродинамічних процесів регульованої гідростатичної опори на основі методу ламінарної аналогії / С.В. Струтинський // Промислова гіdraulіка і пневматика. — 2008. — №4 (22). — С.61—66.
7. Мачалин, Е.В. Гидродинамические особенности протекания жидкости через вращающуюся сетку// Промислова гіdraulіка і пневматика. — 2007. — №2(16). — С. 53—60.
8. Активис, М.А. Гольдберг, В.В. Тензорное исчисление. — М.: Наука, 1969. — 351 с.

Надійшла 21.09.2012 року