

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРТЯ ЗА НАЯВНОСТІ АНІЗОТРОПНИХ ДОМІШОК У СКЛАДІ МАСТИЛА

Національний авіаційний університет

Розглядається орієнтована на чисельний експеримент математична модель процесу тертя в присутності мастила, до складу якого входять тверді частинки з анізотропними властивостями. Для розв'язання задачі чисельного моделювання застосовано модифікований метод розв'язання систем лінійних рівнянь.

Вступ. Борна кислота, широко відома як антисептичний засіб, має також унікальні трибологічні властивості, якими завдячує своїй кристалічній структурі. Тверда (кристалізована) речовина борної кислоти складається з окремих плоских шарів, в яких атоми розташовані близько і щільно поєднані між собою. В той же час відстань між сусідніми рівнями цієї структури відносно велика. Внаслідок цього міжмолекулярні зв'язки між рівнями, обумовлені силами Ван дер Ваальса, – порівняно слабкі. При навантаженнях зсуву ці шари можуть легко ковзати один по одному. При цьому наявність міцних зв'язків у межах кожного рівня запобігає прямому контакту між ковзаючими частинами, знижує тертя і мінімізує зношування. Саме на цьому ефекті основане використання борної кислоти як складової речовини домішок до мастильних олів та плівочних покриттів металевих поверхонь тертя. Подібну шарувату структуру має і графіт, який також широко використовується у складі змашувальних матеріалів.

Постановка проблеми. В результаті наукових досліджень розробляються та синтезуються нові матеріали з подібними до графіту та борної кислоти властивостями. Впровадження нових речовин потребує складного і довготривалого процесу їх дослідження, що включає вивчення властивостей речовини, розробку, створення та практичне випробування відповідних технологічних матеріалів та процесів на її основі. Тому є доцільною розробка математичних моделей, що дозволять засобами чисельного експерименту оцінити перспективність певного напрямку практичних досліджень [1].

Метою статті є розробка математичної моделі процесу тертя в присутності рідкого змащувального матеріалу, до складу якого входять в якості домішки частинки з анізотропними властивостями.

Огляд досліджень та публікацій. За основу запропонованої математичної моделі узято класичні моделі процесів сухого та гідродинамічного тертя [2], а також гідродинамічних процесів [3]. Для проведення чисельного експерименту використано розроблений автором метод розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь [4].

Опис задачі. Оскільки реальні поверхні тертя завжди мають нерівності, область контакту між ними може бути поділена на зони (рис. 1), в яких їх взаємодія має різний характер:

1) зона прямого контакту матеріалів двох поверхонь (рис. 1, позиція 1). В даній зоні має місце тертя поверхонь без мащення (dry friction, solid friction);

2) зона контакту матеріалів через окисну плівку, що присутня на поверхні металу (рис. 1, поз. 2);

3) зона контакту матеріалів через плівку мастил, товщина якої відповідає кільком молекулам мастил (рис. 1, поз. 3);

4) зона, де матеріали розділені товстою (порівняно з характерним розміром молекул) плівкою мастил (рис. 1, поз. 4). Цю зону можна умовно назвати зоною гідродинамічного змащування.

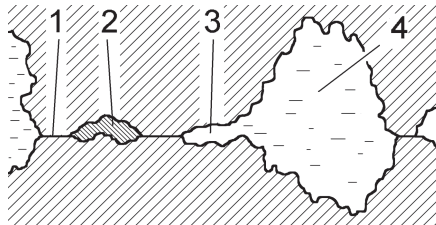


Рис. 1. Схема контакту двох поверхонь: 1 – зона тертя без мащення; 2 – зона контакту через окисну плівку; 3 – зона контакту через плівку оливи молекулярної товщини; 4 – зона гідродинамічного змащування

За різних умов тертя співвідношення між обсягами названих зон може бути різним. В першій та другій зонах олива не бере участі в процесі тертя. Розглядати вплив мастил з точки зору гідродинамічних законів має сенс лише в четвертій зоні, а в третій зоні вирішальну роль відіграє міжмолекулярна взаємодія.

Для розробки базової спрощеної математичної моделі процесу тертя в четвертій зоні розглянемо дві плоскопаралельні поверхні тертя, одна з яких рухається паралельно іншій (рис. 2). Простір між поверхнями заповнено рідким мастильним матеріалом, у складі якого є анізотропні частинки. Їх анізотропія виявляється в тому, що зусилля здвигу частин «зернятка» домішки в одному з напрямків є незначним.

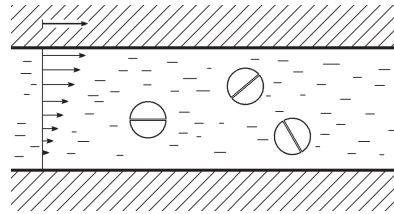


Рис. 2. Схема контакту поверхонь тертя в присутності оливи з анізотропними частинками

Для спрощення вважаємо, що анізотропні частинки мають кульову форму, їх щільність дорівнює щільності рідкого середовища; для кожної частинки задано радіус R_i та коефіцієнт s , що визначає зусилля зсуву S_i :

$$S_i = sR_i^2. \quad (1)$$

Задано також в'язкість оливи μ та коефіцієнти тертя f_1 між оливою та матеріалом поверхонь тертя, і f_2 – між оливою та поверхнею анізотропної частинки.

Для математичного опису задачі використано:

1) рівняння Нав'є-Стокса

$$\begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \right) + \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right); \\ \rho \frac{dv}{dt} &= \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \right) + \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right); \end{aligned}$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right),$$

де ρ – щільність рідини, μ – в'язкість рідини, p – тиск; u, v, w – компоненти швидкості елементарного об'єму рідини; X, Y, Z – компоненти сили, що діє на елементарний об'єм рідини;

2) граничні умови, які обумовлюють невідривність потоку рідини від твердих стінок та визначають сили тертя, які діють між твердою речовиною та рідиною. Граничні умови досить просто задати для плоских поверхонь:

$$v = 0, \quad \mathbf{F} = f_1 (\mathbf{V}_1 - \mathbf{U}) / (V_1 - U) \quad (\text{для верхньої поверхні}),$$

$$v = 0, \quad \mathbf{F} = f_1 \mathbf{U} / U \quad (\text{для нижньої нерухомої поверхні}),$$

де $\mathbf{F}$ – вектор сили, що діє на елементарний об'єм рідини; $\mathbf{V}_1$ – вектор швидкості верхньої плоскої поверхні, $\mathbf{U}$ – вектор швидкості елементарного об'єму рідини, V_1 та U – відповідні модулі цих векторів.

Задання граничних умов для обтікання рідиною анізотропних частинок хоча і можливе у вигляді рівнянь, однак їх використання в чисельному експерименті викликає обчислювальні труднощі через те, що розмір частинок відносно невеликий, і тому для коректного розрахунку поведінки рідини навколо кожної частинки необхідно ввести особливості обчислювальної сітки навкруг кожної частинки і значно збільшувати розмірність задачі. Тому доцільно окремо розв'язати рівняння руху рідини навколо великої кулеподібної частинки, орієнтованої відносно системи відповідним чином, і, використавши отриманий результат як модельну задачу, масштабувати його до розмірів даної частинки.

3) співвідношення, що визначають зусилля зсуву та діють на границі елементарного об'єму рідини (мастильний матеріал вважаємо ньютонівською рідиною):

$$\tau_x = \mu \frac{du}{dy}; \quad \tau_z = \mu \frac{dw}{dy}.$$

Організація та результати чисельного експерименту.

Метою проведеного чисельного моделювання було визначення сили тертя в умовах, зображених на рис. 2. Для того, щоб абстрагуватися від геометричних параметрів експерименту, доцільно віднести отриману силу тертя до площі поверхонь та градієнту швидкості, і

розглядати як результат розрахунку величину $\mu' = \frac{F}{S \cdot (u/h)}$, де F –

сила тертя, S – площа поверхонь тертя, h – відстань між ними, u – швидкість руху однієї з поверхонь відносно іншої. Ця величина є коефіцієнтом в'язкості мастила з домішками. Для розрахунку необхідно задати закон розподілу частинок домішки в мастилі у вигляді функції $c = c(R)$, яка визначає концентрацію частинок залежно від їх розміру. Було обрано рівномірний закон розподілу для вмісту анізотропних частинок розміром від 40 до 400 нм. Зсув в матеріалі анізотропної частинки можливий лише в одній площині відносно її кристалічної ґратки, а спричиняє його проекція зусилля зсуву, що прикладене до частинки з боку оточуючої рідини, на цю площину. При цьому важливим є врахування в'язкості рідини та тертя між рідиною та поверхнями твердих об'єктів. Частинки в оливі орієнтовані випадковим чином, тому в момент спостереження зсув не буде відбуватись у частинок, площина зсуву яких є перпендикулярною до напрямку векторів сил зсуву, а також ті, для яких проекція зусилля зсуву, що діє з боку рідини, на площину зсуву, є меншою за величину (1). Для розрахунків використано запропонований автором чисельний метод [4], реалізований з використанням функцій бібліотеки GNU GMP.

На рис. 3 наведено результати чисельних експериментів у вигляді залежності в'язкості мастильного матеріалу з домішками від в'язкості чистої мастила при постійному вмісті анізотропних частинок. На рис. 4 наведено приклад отриманої залежності в'язкості мастила з домішкою анізотропних частинок від їх вмісту (графік 1) та аналогічної залежності для мастила з домішкою наночастинок, розмір яких є подібний до розміру молекул мастила. (Для таких частинок гідродинамічні співвідношення не діють, а переважний вплив мають сили міжмолекулярного зчеплення.) З графіків рис. 3 та рис. 4 бачимо, що введення домішки зменшує в'язкість мастила, а отже, і силу тертя.

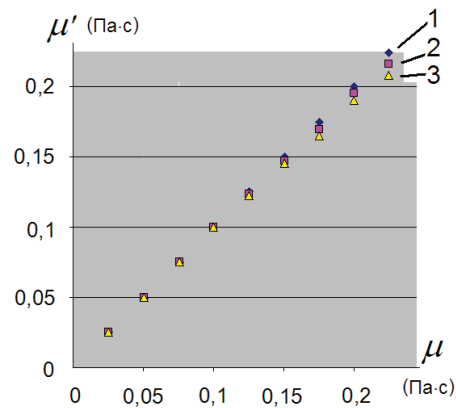


Рис. 3. Залежність в'язкості оливи з домішками, знайденої в результаті чисельного експерименту, від в'язкості чистої оливи при постійному вмісті анізотропних частинок: 1 – анізотропні частинки відсутні; 2 – вміст анізотропних частинок у оливі 1,5 об. %, 3 – вміст частинок 4 об. % .

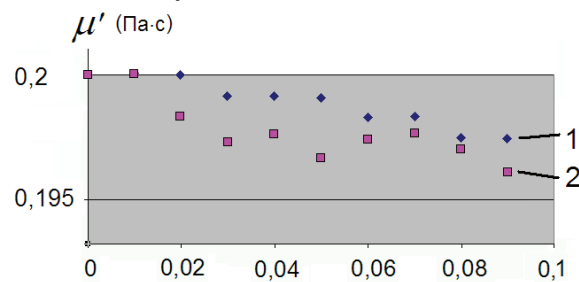


Рис. 4. Приклад залежності в'язкості оливи з домішками від вмісту частинок домішки при постійній в'язкості оливи: 1 – до складу оливи вводяться наночастинки, 2 – до складу оливи вводяться анізотропні частинки

Висновки. В статті розглянуто математичну модель процесу тертя між плоскими поверхнями, що рухаються площинно-паралельно, в присутності рідкого мастильного матеріалу, до складу якого входять в'язкості домішки частинки з анізотропними властивостями. Проведено чисельний експеримент з моделювання гідродинамічних процесів у мастилі з урахуванням впливу анізотропних частинок та наночастинок. В результаті чисельного експерименту отримано приклади залежностей еквівалентної в'язкості мастила з домішками від параметрів та концентрації домішок.

Перспективними напрямками дослідження може бути розв'язання задач чисельного моделювання процесу тертя в інших конфігураціях поверхонь, наприклад – процесу гідродинамічного тертя.

Список літератури

1. Васильев Ю.Н., Фуголь В.А. Математическая модель трения и изнашивания поликристаллических твердых тел //Трение и износ. – 2010. – Т. 31, вып. 2. – С. 127–143.
2. Hori Y. Hydrodynamic lubrication. – Springer, 2006. – 238 p.
3. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Наука, 1984. – 520 с.
4. Glazok O.M. Method of solving systems of linear algebraic equations in the distributed calculating environment //Proceedings of the NAU. Вісник НАУ. – 2010. – № 3 (44). – Рр. 50–55.

Ключові слова: мастило, анізотропія, зсув.

Глазок А.М. **Численное моделирование трения при наличии анизотропных примесей в составе смазки** //Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2011. – Вип. 55. – С. 65–71

Рассматривается математическая модель процесса трения в присутствии смазочного материала, в состав которого входят частицы с анизотропными свойствами. Для решения задачи численного моделирования применен модифицированный метод решения систем линейных уравнений.

Ключевые слова: смазка, анизотропия, сдвиг.

Рис. 4, список лит: 4 наим.

Glazok O.M. **Numerical modeling of friction at presence of anisotropic admixtures in the lubricant composition**

The mathematical model of process of friction in presence of a lubricant containing rigid particles with anisotropic properties is examined. The model is oriented to the numerical experiment. For solving the problem of numerical modeling the modified method of solving of systems of linear equations is applied.

Keywords: lubricant, anysotropy, shear.

Стаття надійшла до редакції 25.02.2011