Consequently, the development of mechanical engineering is directed toward ultra-precision machining (up to 0.001 μm) through the use of ceramic bearings and high-speed processing. The primary challenge remains thermal losses (up to 20%), predominantly within the motor, which cause up to 50% of defects due to deformations of the spindle itself.

From the perspective of further productivity enhancement, a promising solution is the transition to magnetic or low-viscosity fluid bearings, as well as the use of detailed modeling tools for real-time software compensation of machining and motion errors.

**References**

1. Taniguchi N. Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing // CIRP Annals. 1983. Vol. 32, No. 2. P. 573–582. DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60185-1

2. Denkena B., Bergmann B., Klemme H. Cooling of motor spindles—a review // Int J Adv Manuf Technol. 2020. Vol. 110. P. 3273–3294. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-020-06069-0

3. Kakino Y. Latest trend of main spindle for NC machine tool // NTN Tech Rev. 2004. No. 72. P. 2–5.

4. Gebert K. Ein Beitrag zur thermischen Modellbildung von schnelldrehenden Motorspindeln : Dissertation. Aachen : Shaker, 1997. 198 P.

5. Fujii K., Shimuzu S., Mori M. Preload control technology of rolling bearings for machine tool spindles // Journal of the Japan Society for Precision Engineering. 2001. Vol. 67, No. 3. P. 418–422. DOI: https://doi.org/10.2493/jjspe.67.418

*УДК 621.822:536.2:539.3*

**Ковальов В.Д., докт. техн. наук, професор**
**Васильченко Я.В., докт. техн. наук, професор**
**Шаповалов М.В., канд. техн. наук, доцент**
**Міхєєв А.О., аспірант**
**Жила О.В. бакалавр**
Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, kovalov.viktor@gmail.com

## ТЕПЛОПРУЖНІ ДЕФОРМАЦІЇ В ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ

Експлуатаційні характеристики гідростатичних опор значною мірою визначаються параметрами мастильної рідини та конструктивними особливостями самої опори[1,2]. До основних регульованих параметрів належать тиск, витрата та температура мастила, що безпосередньо впливають на його в’язкість і режим роботи опори. Проте навіть оптимізація зазначених параметрів не забезпечує повної точності розрахунків, оскільки більшість процесів у гідростатичній опорі є взаємопов’язаними та нелінійними.

Під дією зовнішніх навантажень, тиску в кишені та температурних факторів виникають пружні й теплові деформації елементів опори. Це призводить до зміни зазору між робочими поверхнями, а отже — до зміни витрати та тиску мастильної рідини. У результаті параметри опори потребують повторного перерахунку з урахуванням нових умов роботи.

Сучасні методики розрахунку гідростатичних опор базуються переважно на врахуванні пружних деформацій. Однак результати практичних досліджень показують, що суттєвий вплив на працездатність опори мають також теплові деформації. Їх ігнорування може спричинити втрату точності або навіть заклинювання вузлів тертя. Особливо це характерно для великогабаритного обладнання, де сезонні температурні коливання та складність підтримання стабільного мікроклімату в цеху спричиняють значні лінійні теплові деформації.

Прикладом такого явища стало заклинювання вертлюга діаметром 1,5 м у вертлюжному супорті токарно-гвинторізного верстата моделі КЖ16234Ф3. Аналогічно, для високоточних верстатів навіть незначні температурні зміни можуть викликати втрату точності

позиціонування шпинделя. Тому актуальною науковою задачею є створення комплексної методики проєктування опор рідинного тертя з урахуванням як пружних, так і теплових деформацій.

У роботі тепловий стан опори розглядається як стаціонарний процес, тобто аналіз проводиться для усталеного температурного поля. Після певного часу роботи температура мастильної рідини на вході та виході із системи стабілізується, що дозволяє вважати теплообмін сталим процесом. Основні теплові процеси, що виникають у гідростатичній опорі, наведено на рисунку 1.

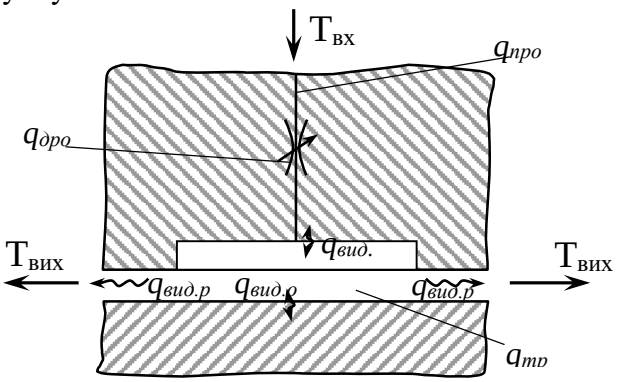


Рис. 1 – Схема протікання теплових процесів у опорі рідинного тертя

У процесі роботи в опорі виникають такі джерела тепла:

- тепло від прокачування мастила через систему $q_{прок}$;
- тепло, що виділяється під час проходження мастила через дросель $q_{дрос}$;
- тепло рідинного тертя $q_{тр}$.

Частина тепла відводиться мастильною рідиною $q_{вид.р}$, а інша частина передається елементам опори $q_{вид.о}$. Зовнішнім фактором є температура навколишнього середовища, яка також впливає на тепловий стан конструкції.

Для визначення температурного поля елементів опори необхідно розв’язати крайову задачу теплопровідності. Для стаціонарного режиму теплопровідність описується рівнянням:

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = 0$$

де $q_v$ - об’ємна густина джерел тепла;

$\nabla^2$- оператор Лапласа.

У прямокутній системі координат оператор Лапласа має вигляд:

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$$

Після визначення температурного поля методом скінченних елементів теплові деформації можуть бути знайдені через коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу. Використання спрощених моделей із середньою температурою є недоцільним, оскільки опори важких верстатів мають складну геометричну форму.

Пружні деформації в опорі визначаються рівняннями теорії пружності, які враховують геометричні параметри опори, тиск у мастильному шарі, величину зазору та властивості мастильної рідини. Важливим параметром є динамічна в’язкість мастила $\mu$, що залежить від температури.

Комплексне врахування пружних і теплових деформацій дозволяє точніше визначити реальний стан опори під час роботи. Спочатку задаються початкові параметри системи, після чого виконуються розрахунки температурного поля та пружних деформацій. Далі визначається зміна зазору в опорі й уточнюються параметри мастильного шару. Процес повторюється ітераційно до досягнення необхідної точності розрахунку.

Запропонований підхід передбачає ітераційний процес уточнення параметрів до досягнення необхідної точності. Для цього рівняння теплового балансу та рівняння пружності доцільно об'єднати в єдину крайову задачу. Найефективнішим методом її розв'язання є метод скінченних елементів, який дозволяє спростити обчислення та підвищити точність результатів.

Таким чином, врахування тепло-пружних деформацій є необхідною умовою підвищення точності та надійності гідростатичних опор важких верстатів. Комплексний підхід до моделювання дозволяє більш повно оцінити вплив температурних і силових факторів на працездатність вузла та забезпечити стабільність його роботи в реальних умовах експлуатації.

**Список посилань**

1. Федориненко Д.Ю. Шпиндельні гідростатичні підшипники: монографія / Д. Ю. Федориненко, С.П. Сапон – Чернігів: ЧНТУ, 2016. – 405 с.

2. Сапон С. П. Моделювання траєкторій руху шпинделя на регульованих гідростатичних опорах / С.П. Сапон // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»: науковий збірник. – Чернігів: ЧНТУ, 2014. – №2(73). – С. 83 – 92.

*УДК 536.46:621.785.3:681.7.067.2*

**Салій С. С., асистент**
**Головко Л. Ф., докт. техн. наук, професор**
**Кагляк О.Д., канд. техн. наук, доцент**
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, saliysergiys@gmail.com

## ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ФРОНТУ ПЛАВЛЕННЯ В ЗАДАЧІ СТЕФАНА ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНИХ ПРОЦЕСІВ

Комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів передбачає одночасну дію гарячого розплаву на поверхню, яка попередньо опромінювалась лазерним випромінюванням. При цьому формування якісного металургійного з'єднання залежить від динаміки плавлення поверхневого шару функціональної складової та розвитку зони дифузійного контакту. Математичне моделювання цих процесів вимагає розв'язання класичної задачі Стефана про міжфазний перехід з рухомою границею розділу фаз, що є першочерговим для оптимізації режимів обробки та передбачення якості біметалу[1-3].

Задача Стефана при лазерно-ливарному формуванні біметалу характеризується високою нестаціонарністю термічного поля, яке визначається потужністю лазерного пучка (P = 500–2000 Вт), його розмірами у фокусі (d = 1–5 мм), швидкістю сканування (v = 5–50 мм/с) та теплофізичними параметрами матеріалів системи ХН60ВТ–Ст3. Фронт плавлення рухається з нестійкою межею контакту твердої і рідкої фаз, що вимагає застосування явних числових схем для адекватного відтворення цього процесу[4-5].

У роботі розроблено та апробовано метод числового розв'язання задачі Стефана з рухомою межею фаз для умов лазерного опромінення. Задача вирішується у двовимірній постановці з розрахунком температурного поля в обох фазах (твердій та рідкій) із врахуванням граничних умов типу Робіна та Дірихле. Умовна межа розділу фаз визначається за критерієм T = Tпл з ітераційним уточненням положення фронту на кожному часовому шарі. Для дискретизації часової змінної застосовується явна схема Ейлера з адаптивним кроком, а для просторової дискретизації — метод скінченних різниць на рівномірній прямокутній сітці із кроком $\Delta x = \Delta y = 0{,}1$ мм.

Результати моделювання показали, що за потужності лазера P = 1500 Вт та швидкості сканування v = 20 мм/с на функціональному шарі формується зона плавлення глибиною 40–60 мкм, що відповідає експериментальним спостереженням. Фронт плавлення рухається нестійко з локальним утворенням мікровиступів на межі розділу, що сприяє інтенсифікації