

О.Ф. Гордеев, к.т.н., проф.
П.О. Захаров, к.т.н., доц.
Луцький державний технічний університет

ГІДРАВЛІЧНІ ОПОРИ ШПИНДЕЛІВ ВЕРСТАТІВ

Розглянуто основні результати дослідження і експлуатації безконтактних опор шпинделів металорізальних верстатів і тенденції їхнього розвитку. Запропоновано нові принципи конструювання безконтактних опор шпинделів верстатів для високопродуктивної точної обробки.

Впровадження таких високопродуктивних методів обробки на верстатах, як, наприклад, силові і високошвидкісне шліфування, визначають підвищені вимоги до жорсткості, швидкохідності та динамічної якості шпиндельних вузлів (ШВ). Підвищення рівня автоматизації машинобудівного виробництва визначає ще більш актуальну необхідність забезпечення надійності металообробного устаткування, особливо такого складного і дорогого, як верстати з ЧПУ, гнучкі виробничі модулі і створювані на їх основі ГВС.

Одним зі шляхів удосконалення конструкцій шпиндельних вузлів верстатів, що задовольняють вимоги високопродуктивної точної обробки, з'явилося використання замість опор шпинделів гідростатичних підшипників (ГСП).

В даний час ГСП застосовуються у важко навантажених і високошвидкісних верстатах для виконання різних функцій: власне опор, приводів мікропереміщень, датчиків навантажень, датчиків розмірів і точності форми, регуляторів динамічної якості шпинделів, динамічного гасителя коливань тощо.

Незважаючи на значний накопичений досвід в області розрахунку, проектування і експлуатації, впровадження гідростатичних опор вимагає особливо кваліфікованого підходу. При проектуванні шпиндельних ГСП необхідний облік безлічі факторів, які залежать від умов їх виготовлення, експлуатації та обслуговування. Характеристики ГСП дуже чутливі до погрешностей виготовлення і зборки, вони змінюються в процесі роботи в залежності від зміни властивостей робочої рідини, температури вузла. На відміну від шпиндельних опор кочення, що значною мірою уніфіковані та стандартизовані, гідростатичні опори практично ексклюзивні в кожному конкретному випадку їх застосування.

Перераховані проблеми з успіхом компенсуються унікальними перевагами ГСП: висока статична жорсткість і демпфірування, надійна фільтрація високочастотних складових коливального процесу при різанні, зменшення (приблизно на порядок) погрешності форми сполучених поверхонь і ряд інших. Тому у даний час назріла необхідність у систематизації концепцій проектування надійних опор на гідростатичному принципі змащення.

Гідростатичні опори зовні (конструктивно) прості, але гідро- і термодинамічні процеси, що протікають в них, з урахуванням хибки та нестабільності геометричних параметрів, гідравлічного ланцюга, систем змащення і охолодження змушують розглядати їх як досить складні системи. Науковий підхід у сполученні з накопиченими знаннями і досвідом сприяє комплексному вирішенню питань раціонального застосування гідростатичних опор.

У 1965 р. вперше в СРСР була створена шпиндельна бабка токарного верстата з гідростатичними опорами шпинделя, і в лабораторних умовах при токарній обробці отримана некруглість 0,1 мкм і шорсткість оброблених поверхонь 12 класу.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження шпиндельних гідростатичних підшипників у ЕНІМСе разом з Московським верстатоінструментальним інститутом стали основою подальшого їх впровадження і широкого поширення в металорізальних верстатах. У 1968 р. на верстатобудівному заводі "Красный пролетарий" разом з ЕНІМСом із верстатоінструментальним інститутом був створений токарно-гвинторізний верстат особливо високої точності з гідростатичними опорами шпинделя. Точність форми і взаємного розташування оброблених поверхонь виробу на верстаті досягла 0,2...0,3 мкм, а шорсткість поверхонь 11–13 класу. У Хабаровському політехнічному інституті були розроблені та впроваджені на ряді підприємств шліфувальні головки з ГСП для заточувальних верстатів. Стійкість різців, заточених на верстатах, оснащених такими голівками, підвищилася в 1,3

рази, витрата алмазних інструментів скоротилися в 2 рази, з'явилась можливість підвищити швидкість шліфування до 80 м/с. На одному з заводів м. Комсомольск-на-Амурі була впроваджена заточувальна ділянка на базі заточувальних верстатів із ГСП, на якому використана одна гідростанція для групи верстатів. У цьому ж інституті розроблені шпиндельні вузли з ГСП для одношпиндельного токарно-револьверного автомата, що були виготовлені на Хабаровському верстатобудівному заводі – некруглість оброблюваних деталей не перевищувала 1,5 мкм, спростилося настроювання і значно підвищилася надійність верстата; оздоблювально-розточувальна голівка, що дозволяє при малій жорсткості розточувальної оправки підвищити точність оздоблювально-розточувального верстата; пристосування для обробки кінців шпинделів, що забезпечує високу точність базування і покращення динамічних характеристик системи ВПД; внутрішшліфувальна голівка, що забезпечує високу стабільність якості обробки за рахунок покращення динамічних характеристик процесів шліфування.

Московським верстатоінструментальним інститутом у співдружності з іншими заводами був розроблений ряд конструкцій верстатів із гідростатичними опорами шпинделів: гама швидкісних оздоблювально-розточувальних голівок, важкий зубошліфувальний верстат, безцентрово-шліфувальні верстати-автомати, верстати для зовнішнього і внутрішнього шліфування кілець підшипників кочення, шліфувальні голівки і електрошпинделі тощо. Науково-технічні рішення розроблені в ЕНІМСі, Мосстанкіні та інших інститутах, а також на ряді верстатобудівних заводів дозволяють широко використовувати в машинобудуванні гідростатичні опори, що забезпечують високу точність, довговічність, швидкохідність, можливість гнучкого керування властивостями устаткування і процесів.

У Луцькому індустріальному інституті розроблені для виробництва ДПЗ-28 шліфувальні голівки для обробки кілець підшипників, розроблений і виготовлений на ПО "Оснастка" заточувальний верстат із ГСП.

Період освоєння ГСП у верстатобудуванні характеризується великим обсягом робіт теоретичного й експериментального плану, а також значним числом винаходів. Пік "захоплення" припав в основному на 70-ті роки, коли були розроблені основні конструкції ГСП, що найчастіше застосовуються, методики їх розрахунку і дослідження.

Останнім часом спостерігається своєрідне насичення, коли виходять праці, присвячені практиці застосування їх у ШВ верстатів різного призначення.

Інтенсифікація режимів обробки на металорізальних верстатах при використанні сучасних інструментальних матеріалів обмежена в основному можливостями шпиндельних вузлів і, перш за все, їх підшипниками [1]. Підшипники кочення, гідравлічні (гідродинамічні та гідростатичні), газові (аеродинамічні і аеростатичні) та магнітні, які використовуються як опори високошвидкісних шпинделів, не забезпечують одночасно повний комплекс вимог, які ставляться до них: висока швидкохідність, малі втрати на тертя, високі статична та динамічна жорсткість і довговічність. Повна реалізація можливостей нових інструментальних матеріалів та переваг технології високошвидкісної обробки може бути використана за умов одночасного використання переваг шпиндельних опор різних типів: кочення, гідравлічних, газових та магнітних. На жаль, можливості суттєвого конструктивного покращення характеристик підшипників названих типів у даний час вичерпані. Високу статичну жорсткість і найкраще демпфірування коливань забезпечують підшипники з рідинним робочим середовищем (гідростатичні і гідродинамічні підшипники). Однак, при збільшенні кутової швидкості ковзання робочих поверхонь таких підшипників навіть при ламінарному режимі витікання мастила, різко зростають втрати потужності на тертя, які стають рівними і навіть перевищують корисну потужність.

Підшипники з газовим робочим середовищем (аеродинамічні та аеростатичні) забезпечують за рахунок малої в'язкості газу високу швидкохідність $(d \cdot n)_{\max}$. Однак, при цьому суттєвими їх недоліками є низька динамічна стійкість, слабке демпфірування коливань; дуже жорсткі вимоги до точності виготовлення контактуючих поверхонь – радіальний зазор у газовому підшипнику не перевищує, як правило, 10 мкм і його можна вважати таким самим, як і величина теплових деформацій деталей підшипника; мала статична жорсткість, що обмежує область використання газових підшипників тільки як опори для шпинделів верстатів, які слабо навантажені (в основному для внутрішнього шліфування отворів [2]).

Відомі спроби, які спрямовані на суміщення в одній конструкції переваг гідравлічних та газових підшипників. Для зменшення втрат на тертя в підшипниках із рідинним робочим середовищем пропонуються різні заходи, наприклад, примусове вдування газу на поверхні поділу рідкого мастила і однієї з робочих поверхонь підшипника [3]. Відомі такі гідрогазові підшипники, які мають дві взаємодіючі між собою поверхні з рідким мастилом між ними. Для зменшення втрат потужності на тертя підшипник регулюють зміною в'язкості мастила біля однієї з поверхонь шляхом нагріву цієї поверхні та утворення прошарку пари між рідиною і деталлю. В обох випадках змішування двох фаз, газової та рідкої, призводить до пінення мастила і підвищення втрат на тертя. В останньому випадку, крім того, необхідне інтенсивне охолодження мастила.

Таким чином, в даний час питання створення надвисокошвидкісних навантажених підшипників шпинделів верстатів не вирішене. Запропоновано новий спосіб змащення, що дозволяє одночасно збільшити переваги і зменшити недоліки, які властиві гідравлічним та газовим підшипникам.

На рис. 1 показаний принцип роботи підшипника з гідрогазовим змащенням – одне з можливих конструктивних рішень гідрогазової опори [4]. Опора складається з втулки 1, яка обертається з кутовою швидкістю ω , і нерухомого шипа 2. Між поверхнями втулки і шипа знаходиться шар рідини 3, який обертається з втулкою, та шар газу 4.

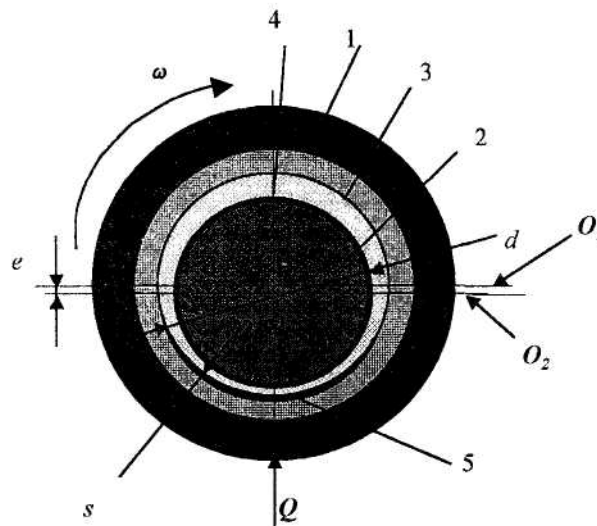


Рис. 1. Принцип роботи гідрогазового підшипника (схема 1)

За рахунок відцентрових сил, що діють на частинки рідини в шарі, виникає гідростатичний тиск з додатним градієнтом вглиб шару в напрямку поверхні втулки. При достатньо великій кутовій швидкості ω шар 3 можна вважати квазітвердим з ідеальною кільцевою поверхнею. При накладанні сили Q втулка зміщується на шип на величину ексцентриситету e , а в конфузорній частині газового шару 4 виникає аеродинамічний тиск. Оскільки тиск на поверхні рідинного шару дорівнює нулю, то за рахунок аеродинамічного тиску він деформується на деяку глибину. Інтеграл тиску по дузі деформованого шару 5 чисельно рівний реакції газорідинного підшипника на навантаження, тобто його навантажувальній здатності.

Недоліком конструкції є те, що вона передбачає нетрадиційну компоновку роторної системи, коли обертається не ротор, а втулка. Однак в ряді випадків, наприклад, шпинделі верстатів для безцентрового шліфування, така компоновка може виявитись кращою.

На рис. 2 схематично зображена умовна конструкція, яка реалізує запропонований спосіб змащення. Особливістю її є використання замість робочої рідини мастила, яке має феромагнітні властивості (ФМР – феромагнітна рідина). Гільза 1 встановлена з зазором на шип 2, при цьому гільза 1 розміщена в конструкції нерухомо, шип 2 – з можливістю обертання. Зазор 3 заповнюють розрахованою кількістю магнітної рідини. Під дією обертового магнітного поля шар рідини 3 рухається в колотовому напрямку по поверхні

гільзи 1. Під дією відцентрових сил у шарі рідини 3, яка обертається, виникає тиск: мінімальний – на вільній границі шару рідини; максимальний – на стінці гільзи 1; таким чином, створюється квазітверда, ідеально кільцева поверхня. Відмінність конструкцій за схемою 1 і схемою 2 полягає в тому, що за рахунок ефекту налипання рідини на нерухому поверхню втулки (схема 2) в останньому випадку необхідно очікувати збільшення втрат на тертя в пограничному шарі рідкої фази мастила. Однак, слід передбачити стабілізуючу дію радіального градієнта тиску і орієнтуючої дії магнітного поля, а розвиток турбулентних процесів – у граничному шарі магнітної рідини. Перевагою схеми 2 є можливість управління режимом тертя в рідкій та газовій фазах мастила в залежності від умов роботи підшипника. Наведені схеми підшипників далеко не обмежують можливі конструктивні реалізації запропонованого способу змащення. Особливо це стосується підшипників із магнітним змащенням.

На рисунках представлені схеми підшипників із обертовою втулкою (рис. 3, 4) та з обертовим валом (рис. 5). Особливістю їх є наявність “вмороженого” в рідкий шар магнітного поля, коли джерело магнітної індукції обертається разом із рухомою деталлю опори [6]. При цьому на рис. 3 і 5 використовуються постійні магніти, на рис. 4 – електромагніти.

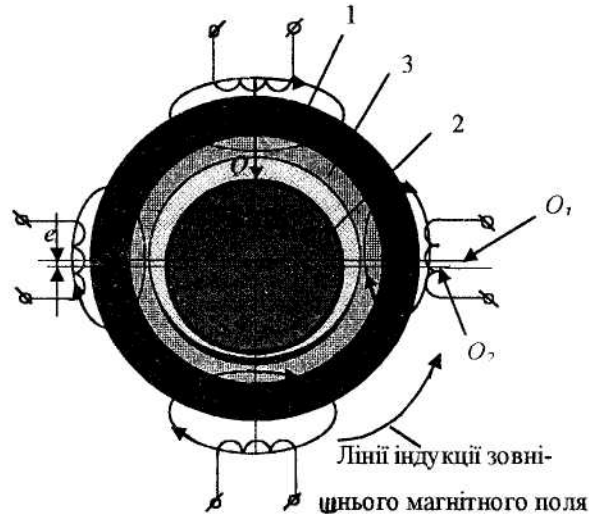


Рис. 2. Гідрогазовий підшипник з магнітним змащенням (схема 2)

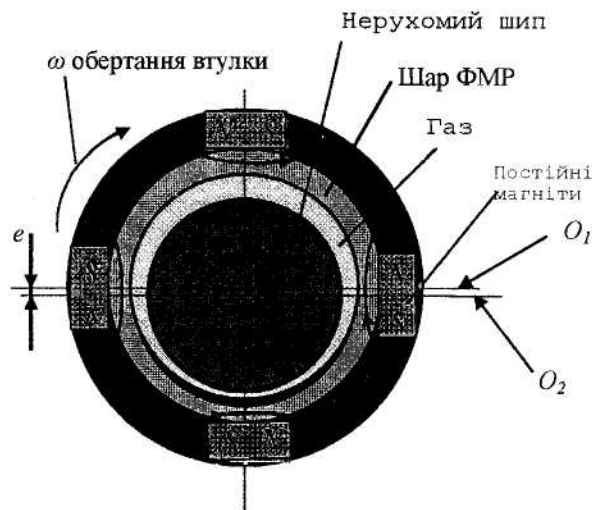


Рис. 3. Підшипник з ФМР і постійними магнітами на втулці, яка обертається

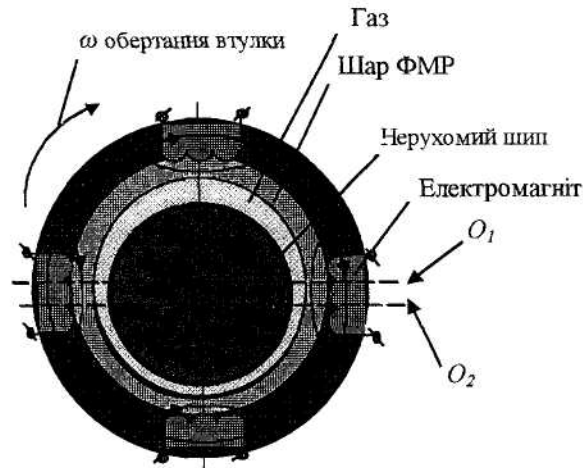


Рис. 4. Підшипник з ФМР і електромагнітами на втулці, яка обертається

Електромагніти, як і у випадку схеми 2 (рис. 2), дозволяють управляти режимом змащення, однак конструктивно такі схеми більш складні та дорогі у використанні. На користь використання схем з обертанням джерел магнітної індукції є більш високий коефіцієнт використання магніторушійної сили. У зв'язку з тим, що основний вклад у навантажувальну здатність забезпечується за рахунок інерційних властивостей мастила, підшипники, побудовані на базі запропонованого способу, можна назвати газогідравлічними інерційними підшипниками (ГГІП). Не дивлячись на різницю в конструкціях і характеристиках ГГІП з наведених вище характеристик мастила, механізм забезпечення ними навантажувальної здатності приблизно однаковий.

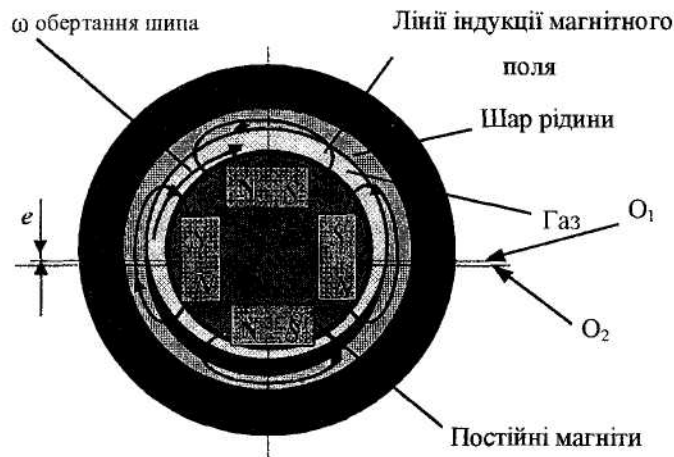


Рис. 5. Підшипник із ФМР і постійними магнітами на шипу, який обертається

Запропоновані способи змащення та принципові конструктивні схеми підшипників дозволяють збільшити переваги і зменшити недоліки, які властиві відомим підшипникам, покращити основні характеристики, такі як швидкохідність, статична та динамічна жорсткість, довговічність, втрати на тертя тощо.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Левина З.М. и др. Расчетный анализ деформационных, динамических и температурных характеристик шпиндельных узлов при проектировании: Методич. рек. – М.: ЭНИМС, 1989. – 63 с.
2. Шейнберг С.А., Жедь В.П. Опоры скольжения с газовой смазкой. – М.: Машиностроение, 1969. – 336 с.
3. Патент США № 3352607, Наук. кл. 308 – 9,1967.
4. Спосіб мащення. Патент України на винахід № 25413А МКВ 6 F16C 15/100.
5. Спосіб мащення поверхонь, що обертаються. Заявка на винахід №98084475 від 18.08.98.
6. Гідрогазовий підшипник. Патент України на корисну модель №714 МКВ 7 F16C 32/06.

ГОРДЕЄВ Олександр Федорович – кандидат технічних наук, професор кафедри верстатів Луцького державного технічного університету, академік АІН України.

Наукові інтереси:

– безконтактні опори шпинделів металорізальних верстатів.

Адреса: 263000 м. Луцьк, вул. Світла, 3, кв. 46

тел. д. (03322)49286, тел. роб. (03322)68068

E-mail: MRV@A256.lutsk.ua

ЗАХАРОВ Петро Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри верстатів Луцького державного технічного університету.

Наукові інтереси:

– безконтактні високошвидкісні опори шпинделів металорізальних верстатів.

Адреса: 263026 м. Луцьк, проспект Соборності, 6, кв. 133

тел. д. (03322) 35133, тел. роб. (03322)68068

E-mail: Zaharov@ldtu.lutsk.ua

MRV@A256.lutsk.ua

Подано 22.06.2001