

УДК 621.822.174

DOI: 10.18372/0370-2197.1(106).19822

О. Ю. ЖОСАН

*Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна*

## ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ГАЗОСТАТИЧНИХ ЛІНІЙНИХ НАПРЯМНИХ У ПРЕЦИЗІЙНОМУ ВЕРСТАТОБУДУВАННІ

*Проведено огляд існуючих конструкцій газостатичних лінійних напрямних. Проаналізовано зміну властивостей несної повітряної плівки залежно від виконання газостатичної опори. Відсутність механічного контакту усуває знос і тертя, підвищуючи довговічність системи. Дослідження підтвердило, що газостатичні опори забезпечують чудові амортизаційні властивості, оскільки повітряна плівка поглинає вібрації, що позитивно впливає на якість обробки та точність позиціонування. Обґрунтовано покращення плавності та точності руху вузла прецизійного верстату на газостатичних опорах, а також обмеження їх використання. Отримані результати будуть використані для проектування прецизійних токарно-шліфувальних верстатів, оптимізації газостатичних систем для досягнення мінімального тертя, високої кінематичної точності та стабільної роботи при змінних навантаженнях.*

**Ключові слова:** газостатична опора, прецизійне машинобудування, повітряна плівка, графіт, жорсткість.

**Вступ та постановка задач дослідження.** Розвиток прецизійного верстатобудування вимагає вдосконалення конструктивних елементів, що забезпечують високу точність, стабільність та плавність руху. Одним із ключових компонентів таких систем є лінійні напрямні, які визначають кінематичну точність та несучу здатність механізмів верстата. Серед технічних рішень особливу увагу привертають газостатичні напрямні, що функціонують на основі несної повітряної плівки, утвореної під дією контрольованого надлишкового тиску. Газостатичні опори забезпечують надзвичайно низьке значення коефіцієнта тертя, відсутність механічного контакту між рухомими елементами та мінімальні деформації, що дозволяє досягти мікронної та субмікронної точності позиціонування. Проте реалізація таких систем потребує ретельного проектування пневматичних систем, контролю витрати повітря, вибору оптимальної геометрії дроселюючих елементів та забезпечення стабільності плівки при змінних навантаженнях. Актуальними також є питання щодо обмеження їх використання, зокрема чутливість до забруднень, складність регулювання, низька жорсткість, низькі частоти коливання системи та необхідність високої точності виготовлення несних елементів.

**Аналіз останніх публікацій з даної проблеми.** Дослідження газостатичних опор і напрямних є актуальним напрямом у прецизійному верстатобудуванні, що обумовлено їхньою здатністю забезпечувати високу точність переміщень, мінімізувати тертя та зношування. У сучасних наукових роботах розглядаються різні аспекти функціонування газостатичних підшипників (вальниць), зокрема вплив геометрії опорної поверхні, параметрів подачі повітря та характеристик мікрорельєфу на стабільність несної плівки.

Встановлено, що газостатичні вальниці зазвичай поділяють на категорії залежно від способу подачі повітря, тобто конструкції дроселюючого елемента.

Основними двома категоріями є опори з пористим дроселем (porous media static air bearing) та підшипники з отворами (orifice static air bearing) [1].

Пористі матеріали визначаються як такі, що складаються з твердої матриці з внутрішніми пустотами, які часто називають порами. Якщо ці пори з'єднані між собою, вони забезпечують проникність матеріалу для рідин і газів. Такий тип пористості називається відкритою пористістю, а здатність матеріалу пропускати рідину чи газ визначається як проникність. Аеростатичні вальниці з пористим матеріалом можуть виготовлятися з будь-якого матеріалу, що має відповідні механічні властивості та достатню проникність для забезпечення необхідного потоку повітря.

Найпоширенішим матеріалом для пористих дроселів є графіт завдяки його сприятливим характеристикам при випадковому контакті між пористим елементом і протилежною поверхнею. Основною перевагою аеростатичних опор з пористого матеріалу є рівномірний розподіл повітря в повітряному зазорі через структуру матеріалу дроселя. Оскільки графітова поверхня фактично містить безліч мікроскопічних отворів, подача повітря є рівномірною, що сприяє максимально однорідному розподілу тиску в повітряному зазорі [2].

Крім графіту, для виготовлення пористих аеростатичних вальниць запропоновано використовувати й інші матеріали, такі як кераміка або металеві піни, наприклад спечена алюмінієва оксидна кераміка. Спечена алюмінієва оксидна кераміка є синтетичним матеріалом з високою регулярністю структури, що забезпечує однорідність властивостей між виробничими партіями.

Графіт характеризується ефективними антифрикційними властивостями при контакті з поширеними матеріалами контрповерхонь. Крім того, при контакті підшипника з протилежною поверхнею характеристики потоку в пористому матеріалі практично не змінюються, тоді як сопла підшипників з отворами можуть бути заблоковані.

Попри переваги пористих аеростатичних підшипників, у комерційних рішеннях ширше застосовуються підшипники з отворами. Це пояснюється тим, що технологія отворів була розроблена раніше. Підшипники з отворами дуже чутливі до розміру та геометрії сопел, що ускладнює їх виготовлення та робить їх вразливими до подряпин [3]. Вибір типу, форми та розташування отворів здійснюється відповідно до вимог застосування та бажаних експлуатаційних характеристик.

У таких підшипниках можуть використовуватися різні типи повітряних камер та канавок, які можуть бути інтегровані в систему подачі повітря. Проте збільшення об'єму повітря в повітряному зазорі за рахунок цих елементів може зменшити демпфуючі властивості підшипника. Підшипники з пористого матеріалу забезпечують вищу двонаправлену проникність повітря порівняно з підшипниками з соплами, що частково покращує їх експлуатаційні характеристики.

Аеростатичні підшипники використовують попередньо стиснене газове середовище, найчастіше повітря, як мастильний шар між підшипниковим елементом та протилежною поверхнею. Високонапірна повітряна плівка розділяє ці елементи, що робить аеростатичні опори практично ідеальними машинними елементами, коли основними вимогами є мінімальне тертя, відсутність зношування та висока точність позиціонування.

Крім повітря, можуть застосовуватися інші гази, наприклад азот, а також процесні гази, що запобігають забрудненню технологічного середовища.

Оскільки аеростатичні системи мають високу точність, їхні компоненти можуть бути пошкоджені забрудненнями. Тому подане в систему повітря має бути чистим. Джерелом повітря для аеростатичних підшипників зазвичай є спеціальні безмасляні повітряні лінії, які мають вищу чистоту та стабільний тиск, порівняно із загальною мережею стисненого повітря.

Товщина змащувальної повітряної плівки зазвичай становить від 2 мкм до 10 мкм, що висуває жорсткі вимоги до точності виготовлення самих вальниць та механізмів, у яких вони застосовуються [4]. Поверхні протилежних елементів повинні мати високу стабільність і рівність, бути стійкими до корозії та мати механічну безпеку на випадок контакту. Оскільки розміри протилежної поверхні зазвичай перевищують розміри підшипника, вимоги до її виготовлення є ще більш складними.

Це ставить перед виробництвом аеростатичних підшипників суворі технологічні вимоги. Графіт, який є найбільш поширеним матеріалом для пористих дроселів, може оброблятися на звичайних токарних, фрезерних і шліфувальних верстатах. Однак графіт є абразивним матеріалом, тому для його обробки необхідно використовувати зносостійкий ріжучий інструмент. Інструмент, що не відповідає вимогам, швидко зношується та створює великі похибки мікрогеометричних характеристик оброблювальної поверхні графіту. Найчастіше для обробки графіту використовуються алмазні інструменти, оскільки вони мають високу зносостійкість.

Окремі дослідження присвячені чисельному та експериментальному моделюванню розподілу тиску у газовому зазорі, що дозволяє прогнозувати жорсткість та несну здатність опор. Також вивчаються технологічні аспекти виготовлення таких напрямних, включаючи точність обробки поверхонь, методи керування подачею стисненого газу та способи компенсації впливу зовнішніх факторів, таких як температурні деформації та забруднення.

Відомо, що притирання є одним із ефективних методів доведення поверхні для аеростатичних опор на основі графіту. Даний процес може виконуватися як із застосуванням окремої притиральної поверхні, так і безпосередньо по поверхні самої напрямної. Для підвищення швидкості зняття матеріалу зазвичай використовуються алмазні або силіконові притиральні пасти.

Згідно з останніми дослідженнями, даний процес є особливо ефективним у випадках, коли поверхня підшипника має складний профіль і не є плоскою. У таких ситуаціях доведення зазвичай здійснюється по робочій поверхні опори ковзання, наприклад, у випадку циліндричних або сферичних аеростатичних вальниць [5, 6].

Однак у промисловому виробництві важливим фактором є продуктивність процесу. Висока тривалість притирання обмежує його застосування в серійному виробництві, що змушує дослідників розробляти альтернативні методи забезпечення високої точності та якості поверхні газостатичних напрямних.

**Мета роботи** – аналіз конструктивних особливостей газостатичних лінійних опор і напрямних та вивчення впливу їхніх геометричних та фізичних параметрів на експлуатаційні характеристики газостатичної вальниці. Особлива увага приділяється аналізу розподілу тиску в несній повітряній плівці, динамічної жорсткості опори та стабільності роботи при змінних навантаженнях.

**Сучасні підходи до вимірювання характеристик газостатичних підшипників.** Сучасні експериментальні підходи оцінки характеристик

газостатичних підшипників базуються на впровадженні автоматизованих вимірювальних установок, що дозволяють мінімізувати похибки та підвищити точність експериментальних даних.

Для забезпечення високої точності вимірювань використовуються спеціалізовані механізми з гнучкими шарнірами, що виключають люфти та мінімізують тертя, характерні для традиційних аеростатичних втулок та кульових з'єднань. Контрольоване переміщення підшипника в напрямку несного навантаження реалізується за допомогою комплаєнтного чотириланкового механізму, який обмежує зайві ступені свободи та мінімізує непередбачувані переміщення.

В якості опорної поверхні застосовується притертий гранітний куб з високою площинністю ( $<1$  мкм) та мінімальною шорсткістю ( $Rz < 3$  мкм) базової поверхні [7]. Несне навантаження створюється високоточним пневматичним циліндром із металевими ущільненнями, що забезпечує низький рівень внутрішнього тертя та відсутність ефекту «залипання-ковзання». Регулювання тиску виконується точним пневморегулятором, а контроль навантаження здійснюється тензометричним датчиком сили високої точності (рис. 1).

Усі вимірювання проводяться з урахуванням впливу допоміжних факторів, таких як власна маса зразка та вимірювальних компонентів. Загальна точність вимірювань визначається через калібрування та верифікацію сенсорних систем, що дозволяє отримувати коректні результати для порівняльного аналізу газостатичних підшипників різних конструкцій.

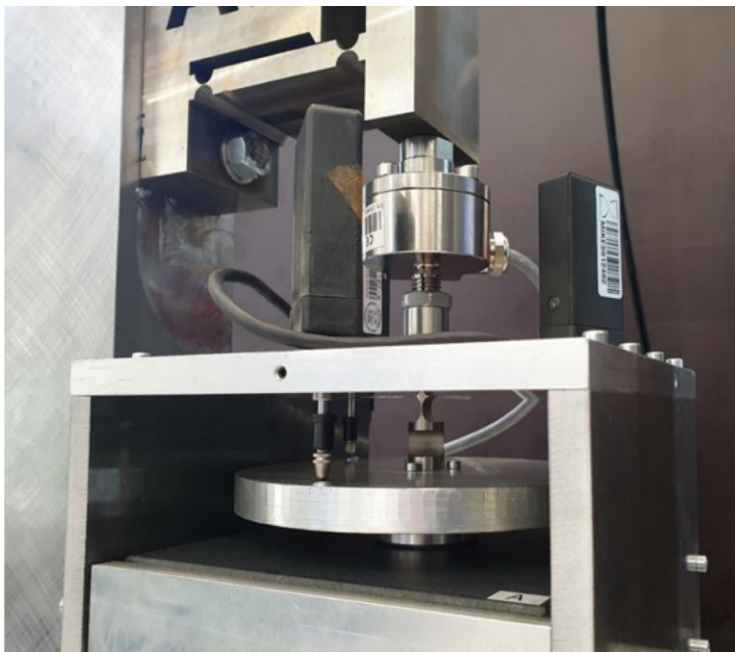


Рис. 1. Вимірювальний стенд контролю газостатичних підшипників [7].

Відхилення системи, що включає газостатичну опору, значною мірою залежить від жорсткості повітряної плівки між газостатичною вальницею і її опорною поверхнею. Статична жорсткість газостатичної опори може бути розрахована за наступним рівнянням, аналогічно до жорсткості традиційних систем:

$$S = \frac{\partial F}{\partial h} \quad (1)$$

де  $S$  – жорсткість повітряної плівки,  $\partial F$  – зміна прикладеної сили,  $\partial h$  – зміна висоти товщини повітряної плівки.

Для одержання достовірних даних при оцінці характеристик газостатичних підшипників необхідне використання сучасного вимірювального обладнання, яке забезпечувало б високу точність отриманих даних. Наприклад, система збору та обробки даних може базуватися на модулі National Instruments USB-DAQ 6215, керованому за допомогою програмного коду в середовищі Matlab. Ця система дозволяє реєструвати витрату повітря, силу навантаження та показники датчиків тиску, а також керувати регуляторами тиску. Зібрані дані зберігаються у файлах вимірювань та обробляються в Matlab для побудови графіків одержаних результатів вимірювань.

Для вимірювання висоти повітряного зазору використовуються індуктивні лінійні датчики. Найкраще датчики розміщувати під кутами  $120^\circ$  навколо зразка, що дозволяє визначати середнє арифметичне значення вимірювань та підвищувати точність оцінки повітряного зазору.

Площинність поверхні зразків визначається за допомогою координатно-вимірювальних машин. Вимірювальні точки розташовуються на концентричних колах навколо центральної точки зразка.

Для оцінки параметрів шорсткості використовується оптичний профілометр. Вимірювання має проводитися у трьох точках: у центрі зразка, в середній точці радіуса та на краю. В кожній зі зазначених точок обирається ділянка розміром  $1 \times 1$  мм, на якій обчислюється середнє арифметичне значення параметрів шорсткості.

Притирання може проводитись машинно на координатно-фрезерному верстаті шляхом тертя зразка по лекальній поверхні. Площинність поверхні граніту, відносно якої відбувається процес притирання, має бути не більше  $0,75$  мкм. Процес притирання має включати комбіновані рухи для рівномірного зняття матеріалу зі всієї площі та рівномірного зносу притиральної поверхні. Видалення відходів процесу здійснюється за допомогою спрямованого повітряного потоку або відцентрових сил.

**Аналіз експлуатаційних характеристик газостатичних лінійних напрямних.** Результати теоретичного дослідження підтверджують, що основні експлуатаційні характеристики газостатичних лінійних напрямних, зокрема несна здатність, динамічна жорсткість і стійкість повітряної плівки, безпосередньо залежать від геометричних параметрів опор, типу дроселюючих елементів і режимів подачі стисненого газу. Найбільша несуча здатність спостерігається у зразків з найбільш плоскою поверхнею, що узгоджується з даними, наведеними в попередніх дослідженнях. Різниця у статичній несучій здатності між найкращими зразками після притирання та найкращими обробленими механічним способом виявилася незначною. На основі огляду сучасного стану досліджень можна було б очікувати значно більшої різниці між зразками, оскільки притирання повинне забезпечувати значно кращу несучу здатність. Проте в дослідженні [7] аналізувалася лише статична характеристика підшипників, тоді як за динамічних умов результати можуть бути іншими. Отримані результати піднімають питання щодо необхідності жорстких допусків при виготовленні аеростатичних підшипників із пористих матеріалів. Крім того, при порівнянні несучої здатності зразків із їхньою площинністю виявлено чітку

кореляцію: навіть коли площинність оцінюється як залишкова різниця між найвищою і найнижчою вимірною точкою, найбільш плоскі поверхні мають найвищу несучу здатність. Несуча здатність, як правило, зменшується разом зі зниженням площинності поверхні.

Згідно з отриманими даними, шорсткість поверхні суттєво впливає на повітряний потік у підшипнику [7]. Зразки після притирання мають найкращі мікрогеометричні характеристики поверхні, а отже, найменший відкритий об'єм між зразком і протилежною поверхнею через мінімальну кількість поверхневих нерівностей. Менший відкритий об'єм призводить до підвищеної жорсткості повітряного зазору, оскільки він менше стискається в порівнянні зі зразками з більш шорсткою поверхнею. При висоті повітряного зазору менше 1,5 мкм у зразків з кожного матеріалу спостерігається однакова тенденція у витраті повітря: зразок із найбільшим відхиленням мікрогеометричних параметрів поверхні, що забезпечується при її обробці, має найвищу витрату. Проте при збільшенні повітряного зазору «дрібнозернисті» зразки мають або найвищу, або принаймні таку ж високу витрату, як і «грубі» зразки. Оскільки зразки з різних матеріалів демонстрували подібну поведінку між «дрібнозернистими» і «грубими» зразками, але мали різну площинність, лише геометрія поверхні не може пояснити більш швидке зростання витрати у «дрібнозернистих» зразках при збільшенні висоти зазору.

При малих значеннях повітряного зазору можливий фізичний контакт зразка з протилежною поверхнею. Кут нахилу значно варіюється між різними зразками та при різних висотах повітряного зазору. Найбільш імовірною причиною цієї варіації є відмінності у площинності поверхонь. Наприклад, зразок може мати опуклу поверхню, що робить його нестійким, що пояснює значні коливання кута і навіть фізичний контакт з протилежною поверхнею. Ймовірною причиною контакту поверхонь з різних марок графіту є відмінності у його структурі: матеріал, який має нижчу проникність повітря, забезпечує недостатній для утримання зразка над поверхнею при малих висотах повітряного зазору повітряний потік. Для всіх досліджуваних в роботі [7] зразків не досягається абсолютний нульовий повітряний зазор, що є логічним, оскільки у деяких зразків планарність поверхні вища за залишковий повітряний зазор. Внаслідок цього визначення абсолютного нульового значення повітряного зазору є складним завданням.

Методи та прилади, використані в роботі [7], дозволяють лише опосередковано оцінити момент контакту між зразком та протилежною поверхнею. Тому для точного вимірювання висоти повітряного зазору має розглядатися використання інтерферометрії.

Результати короткозамкнутого потоку повітря демонструють чітку різницю між зразками з одного матеріалу. У процесі виготовлення «грубі» зразки проходили лише один прохід точіння при підвищених подачі та швидкості різання, тоді як «дрібнозернисті» та «притерті» зразки спочатку точилися з меншою подачею та швидкістю. Після цього «притерті» зразки піддавалися додатковому фінішуванню. Отже, «дрібнозернисті» та «притерті» зразки були подібними за способом обробки до моменту проведення фінішування. Як показують результати, притирання зменшує витрату повітря за будь-якого рівня тиску. Як видно з результатів, зразки після дрібнозернистої механічної обробки мали вищу витрату повітря, порівняно із зразками після грубої механічної обробки та притирання [7]. Деформація структури графіту під час механічної

обробки створює відмінності в короткозамкненому потоці між зразками з одного матеріалу. Основна проблема аналізу таких потоків – брак інформації про короткозамкнений потік у немодифікованому графіті. Оскільки зразки після притирання були подібними до дрібнозернистих вихідних матеріалів, можна зробити висновок, що притирання як процес зменшує проникність повітря через графіт. Це може бути спричинено або закриттям пор графіту під час процесу притирання, або тим, що абразивна обробка відкриває нову поверхню, яка не зазнала впливу механічної обробки.

Таким чином, на характеристики газостатичних опор найбільший вплив створює матеріал (в проаналізованих дослідженнях – графіт) аеростатичних підшипників, який, залежно від методу обробки, характеризується різними мікрогеометричними параметрами поверхні та пористістю. Отримані результати будуть використані для розробки конструктивних рішень при проектуванні прецизійного токарно-шліфувального верстата, що поєднує високу кінематичну точність з мінімальним тертям та зносом напрямних.

### **Висновки**

Проведене теоретичне дослідження газостатичних лінійних напрямних підтвердило їхню високу ефективність у забезпеченні точності, плавності та стабільності руху вузлів прецизійних верстатів. Встановлено, що ключовими параметрами, які визначають роботу газостатичних опор, є розподіл тиску в повітряній плівці, жорсткість напрямних та характеристики дроселюючих елементів. Газостатичні опори мають значні переваги для прецизійних напрямних верстатів, забезпечуючи високу точність і жорсткість завдяки рівномірному розподілу повітряного тиску, що мінімізує деформації та відхилення при русі. Відсутність механічного контакту між поверхнями усуває зношування та тертя, що підвищує довговічність системи. Важливою їх характеристикою є ефективні демпфуючі властивості, оскільки повітряний шар поглинає вібрації, що позитивно впливає на якість обробки та точність позиціонування. Газостатичні напрямні забезпечують плавне переміщення без ривків навіть при високих швидкостях, що важливо для динамічних процесів у високоточних верстатах. Також мінімальне тертя суттєво знижує теплові деформації, що сприяє стабільності розмірів оброблюваних деталей. Проте є й певні недоліки, зокрема складність у виготовленні та налаштуванні, що вимагає високоточної обробки поверхонь і відповідного розрахунку системи подачі повітря. Необхідність стабільного джерела стисненого повітря призводить до додаткових експлуатаційних витрат, а наявність витоків повітря може впливати на ефективність роботи. Попри це, газостатичні опори залишаються одним із найкращих рішень для надточних напрямних завдяки їхній унікальній комбінації точності, довговічності та динамічних характеристик.

Отримані результати мають практичне значення для проектування високоточних токарно-шліфувальних верстатів. Використання газостатичних напрямних дозволяє мінімізувати зношування, покращити кінематичну точність і забезпечити стабільність роботи при змінних навантаженнях. Перспективним напрямом подальших досліджень є експериментальна перевірка отриманих теоретичних висновків та оптимізація конструкцій газостатичних систем для застосування у верстатобудуванні.

---

---

### Список літератури

1. Qiang Gao, Wanqun Chen, Lihua Lu, Dehong Huo, Kai Cheng *Aerostatic bearings design and analysis with the application to precision engineering: State-of-the-art and future perspectives*, Tribology International, Volume 135, 2019, p. 1-17, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.020>.
2. Nield D.A., Bejan A. *Convection in porous media*, Springer International Publishing, New York <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49562-0>
3. Belforte, G., Colombo, F., Raparelli, T. et al. *Comparison between grooved and plane aerostatic thrust bearings: static performance*. Meccanica 46, 547–555 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11012-010-9307-y>
4. Wardle F. *Ultra precision bearings*, 978-0-85709-218-2, Elsevier, 2015, p. 442.
5. Rasnick W.H. *Air-bearing slides for precision X-Y turning machines: Technical Report*, United States Atomic Energy Commission, 1971.
6. Rasnick W.H. *Air-bearing rework and impregnation: Technical Report*, United States Atomic Energy Commission, 1972.
7. Valtteri Vainio, Mikael Miettinen, Jaakko Majuri, René Theska, Raine Viitala *Manufacturing and static performance of porous aerostatic bearings*, Precision Engineering, Volume 84, 2023, p. 177-190, ISSN 0141-6359, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.06.014>.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2025.

**Жосан Олександр Юрійович** – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: [5679249@stud.kai.edu.ua](mailto:5679249@stud.kai.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-4649-8222>



---

O. ZHOSAN

### ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF STATIC AIR BEARING LINEAR GUIDEWAYS IN PRECISION ENGINEERING

The aim of this study was to analyze the structural features of gasostatic linear guides and evaluate the influence of their geometry, supply pressure, and surface characteristics on dynamic stiffness and motion accuracy. It was found that uniform air pressure distribution in the load-bearing film minimizes deformations and movement deviations, ensuring high precision and smooth motion. The analysis of pressure distribution in the air film showed that the stiffness of the guides and the characteristics of porous elements significantly affect the stability and accuracy of movement. The absence of mechanical contact eliminates wear and friction, enhancing the durability of the system. The study confirmed that gasostatic supports provide excellent damping properties, as the air layer absorbs vibrations, positively affecting machining quality and positioning accuracy. However, challenges such as sensitivity to contamination, complexity of adjustment, and the need for high-precision surface manufacturing were identified. The necessity for a stable compressed air source and potential air leakage were also noted as limitations. The obtained results will be used for designing precision lathe-grinding machines, optimizing gasostatic systems to achieve minimal friction, high kinematic accuracy, and stable operation under varying loads.

**Keywords:** gas-static support, precision engineering, load-bearing air film, graphite, stiffness.

#### Referenses

1. Qiang Gao, Wanqun Chen, Lihua Lu, Dehong Huo, Kai Cheng *Aerostatic bearings design and analysis with the application to precision engineering: State-of-the-art and future perspectives*, Tribology International, Volume 135, 2019, p. 1-17, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.020>.
2. Nield D.A., Bejan A. *Convection in porous media*, Springer International Publishing, New York <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49562-0>
3. Belforte, G., Colombo, F., Raparelli, T. et al. *Comparison between grooved and plane aerostatic thrust bearings: static performance*. Meccanica 46, 547–555 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11012-010-9307-y>
4. Wardle F. *Ultra precision bearings*, 978-0-85709-218-2, Elsevier, 2015, p. 442.
5. Rasnick W.H. *Air-bearing slides for precision X-Y turning machines: Technical Report*, United States Atomic Energy Commission, 1971.
6. Rasnick W.H. *Air-bearing rework and impregnation: Technical Report*, United States Atomic Energy Commission, 1972.
7. Valtteri Vainio, Mikael Miettinen, Jaakko Majuri, René Theska, Raine Viitala *Manufacturing and static performance of porous aerostatic bearings*, Precision Engineering, Volume 84, 2023, p. 177-190, ISSN 0141-6359, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.06.014>.

**Oleksandr Zhosan** – graduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: [5679249@stud.kai.edu.ua](mailto:5679249@stud.kai.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-4649-8222>.