

УДК 678.027.3

DOI 10.36910/775.24153966.2022.74.11

Н.Ю. Імбірович¹, Д.А. Захарчук¹, С.А. Федосов²¹Луцький національний технічний університет²Волинський національний університет імені Лесі Українки**ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕНЬ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ**

Стаття аналізує публікації авторитетних світових науковців в області гальмівних систем (гальмівних накладок) з метою знайти закономірності щодо підтримки та розвитку цього напрямку в Україні, визначити перспективи для спільних досліджень. Окреслено коло провідних видань у науковій області, проаналізовано фактори впливовості вчених різних країн на розвиток цієї області. Дослідження базується на результатах даних, опублікованих у міжнародній наукометричній базі Scopus. Виконано аналіз і сформульовано пропозиції для покращення поширення результатів вітчизняних вчених у світовій науковій спільноті за цим напрямком.

Ключові слова: гальмівні накладки, наукові дослідження, публікації, галузі знань.

N. Imbirovich, D. Zakharchuk, S. Fedosov**PROBLEMS AND PROSPECTS OF RESEARCH OF MATERIALS FOR AUTOMOBILE BRAKING SYSTEMS**

The article analyzes the publications of authoritative world scientists in the field of brake systems (brake pads) with the aim of finding regularities regarding the support and development of this direction in Ukraine, to determine prospects for joint research. The range of leading publications in the scientific field is outlined, the factors influencing the development of this field by scientists of different countries are analyzed. The study is based on the results of data published in the international scientometric database Scopus. The analysis was carried out and proposals were formulated to improve the dissemination of the results of domestic scientists in the world scientific community in this direction.

Keywords: brake pads, scientific research, publications, subject areas.

Постановка проблеми. Дискові гальма є найуживанішим різновидом автомобільних гальм. Дискове гальмо – тип гальма, що створює тертя притисканням пар колодок супортами до диска. Саме гальмівні накладки створюють гальмівне прискорення, завдяки взаємодії з поверхнею колеса або гальмівного диска і перетворення сили натискання на гальмівний момент, і тому активно застосовуються на всіх видах колісного транспорту. Не дивним є висока зацікавленість науковців усього світу до досліджень пов'язаних з основним робочим компонентом гальмівної системи, а саме гальмівними накладками (колодками).

Поступове припинення використання азбесту в фрикційних матеріалах автомобільних гальм у багатьох частинах світу спричинило початок масштабних досліджень і розробок безпечніших альтернатив. Як наслідок, за останні два десятиліття у промисловості фрикційних гальмівних систем з'явилися різні гальмівні колодки, кожні з яких мали власний унікальний склад, але виконували ту саму задачу та претендували на те, щоб бути кращими за інші. Це свідчить про те, що вибір фрикційних матеріалів для гальм базується більше на традиції та експериментальних пробах і помилках, а не на фундаментальному розумінні. Україна, маючи великий науковий потенціал, значно поступається [1], своїм як фундаментальним так і прикладним доробком, досягненням світової наукової спільноти.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – виконати аналіз досліджень, які стосуються гальмівних накладок, зробити спробу визначити особливості розвитку даної тематики у світі та пошуку шляхів ефективного розвитку цього напрямку в Україні.

Методологія досліджень. Проведено аналіз публікацій, індексованих у наукометричній базі Scopus за ключовими словами (тегом) «brake pads» (гальмівні накладки або колодки). Для порівняльного аналізу відібрано статті з пошуку у назві статті (Article title), анотації (Abstract) і ключових словах (Keywords) в усіх відображених наукових працях (1957-2022 pp) і за період 2016-2022 pp. Аналізувалися: країни авторів, наявність фінансової підтримки досліджень, журнал, у якому здійснено публікацію, рік публікації та їх кількість, а також і самі публікації.

Викладення основного матеріалу. Вивченням проблем, які пов'язані з дослідженнями гальмівних колодок займається велика кількість науковців усього світу. У наукометричній базі даних Scopus за період 1957-2022 pp. опубліковано 3 138 наукових праць пов'язаних з даною тематикою. Більше третини з цих публікацій припадає на 2016-2022 pp. – 1 363. Високі сумарні h-індекси (h = 89 і 39) лише підтверджує велику зацікавленість науковців до цих досліджень і підвищений інтерес в останні роки.

Більше половини всіх робіт незмінно опубліковано вченими з Китаю та Індії. Серед країн-лідерів, також, були і залишаються: США, Німеччина, Південна Корея, Японія, Італія, Польща. Важливим є те, що впродовж 2016-2022 рр. суттєво зріс науковий інтерес, а як результат збільшилося кількість публікацій науковців з Південної Кореї, Індонезії, Турції, Малазії. Зокрема Південна Корея на сьогодні поступається за кількістю публікацій лише Китаю та Індії, обігнавши І США і Німеччину, а Індонезія, Турція, Малазія – такі розвинуті країни як Франція, Великобританія. Значно важливіше знати не країни-лідери, а установи, де проводяться передові дослідження, щоб переймати досвід їхньої діяльності. Такі дослідження з даної тематики зосереджено у провідних науково-дослідних центрах (табл. 1, рядок 1), серед яких: *Southwest Jiaotong University, Brembo S.p.A., Bialystok University of Technology, The Royal Institute of Technology KTH, Tongji University, Indian Institute of Technology Delhi*. Саме ці центри займали і займають лідируючі позиції з досліджень присвячених розробкам гальмівних накладок, а отже володіють високим науковим потенціалом і найкращими матеріально-технічними базами. Закономірно, що провідні центри належать саме країнам-лідерам, досвід яких українським науковцям слід вивчати і переймати, а організаціям налагоджувати тісні партнерські відносини.

Табл. 1

Порівняльна характеристика щодо організацій світових досліджень в області «гальмівні накладки» (brake pads)

1957-2022 рр.		2016-2022 рр.
<i>Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf (Algeria)</i> <i>Bialystok University of Technology</i> <i>The Royal Institute of Technology KTH</i> <i>Indian Institute of Technology Delhi</i> <i>Tongji University</i> <i>Southwest Jiaotong University</i> <i>Technische Universität Braunschweig</i> <i>Brembo S.p.A.</i> <i>Universiti Teknologi Malaysia</i> <i>Ford Motor</i>	Науково-дослідні центри	<i>Southwest Jiaotong University</i> <i>Brembo S.p.A.</i> <i>Bialystok University of Technology</i> <i>Vellore Institute of Technology</i> <i>The Royal Institute of Technology KTH</i> <i>Tongji University</i> <i>B.S.Abdur Rahman University</i> <i>Università di Trento</i> <i>University of Science and Technology Beijing</i> <i>Indian Institute of Technology Delhi</i>
<i>National Natural Science Foundation of China</i> <i>European Commission</i> <i>Horizon 2020 Framework Programme</i> <i>Ministry of Trade, Industry and Energy</i> <i>National Key Research and Development Program of China</i> <i>Fundamental Research Funds for the Central Universities</i> <i>Seventh Framework Programme</i> <i>Deutsche Forschungsgemeinschaft</i> <i>European Regional Development Fund</i> <i>National Research Foundation of Korea</i>	Організації, що фінансують дослідження	<i>National Natural Science Foundation of China</i> <i>European Commission</i> <i>Horizon 2020 Framework Programme</i> <i>Ministry of Trade, Industry and Energy</i> <i>National Key Research and Development Program of China</i> <i>Fundamental Research Funds for the Central Universities</i> <i>European Regional Development Fund</i> <i>Seventh Framework Programme</i> <i>National Research Foundation of Korea</i> <i>Natural Science Foundation of Liaoning Province</i>

Важливим аспектом для проведення досліджень є їх фінансова підтримка. Найбільшими світовими організаціями, що фінансують дослідження в даній галузі – здебільшого організації з Китаю, США і країн ЄС (табл. 1, рядок 2): *National Natural Science Foundation of China, European Commission, Horizon 2020 Framework Programme, Ministry of Trade, Industry and Energy, National Key Research and Development Program of China, Fundamental Research Funds for the Central Universities* тощо. Майже усі ці організації, як і були, так і залишаються незмінними донині основними спонсорами досліджень. Єдиною організацією яка активізувала свою фінансову підтримку в останні роки є *Natural Science Foundation of Liaoning Province*. Тому для успішної реалізації досліджень українським науковцям слід шукати шляхи для їх фінансової підтримки саме серед цих потужних організацій. Як один із варіантів для українських вчених – виконання своїх досліджень або в закордонних інституціях, які вже мають таку підтримку, вигравши певний дослідницький грант, або плідна співпраця української організації із закордонною.

У найцитованіших і водночас найновіших публікаціях (2016-2022 рр.) відображаються найбільш прогресивні і актуальні результати за даною тематикою. Аналіз самих публікацій за тегом «brake pads» вказує на високе наукове і практичне значення таких досліджень. Зокрема

найбільш цитоване дослідження [2] (218 цитувань) є спробою виявити та дослідити важкі метали в міському та автомагістральному пилю, а також у пилю гальмівних накладок та шин. Вибрані метали Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Se, Sr, Ba, Ti та Pd аналізували за допомогою мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою, оптичної емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ICP) та атомно-абсорбційної спектрометрії фракційованої за розмірами дорожнього пилю та пилю гальмівних накладок (<20, 20–56, 56–90, 90–250 і >250 мкм). Склад гальмівних накладок і шинного пилю також досліджували за допомогою скануючої електронної мікроскопії – енергодисперсійної спектроскопії. Для оцінки ступеня потенційного екологічного ризику викидів проведено порівняння з геохімічним фоном та розрахунки індексів геоаккумуляції. Найдрібніші фракції міського та автомобільного пилю були значно забруднені всіма дослідженими металами, особливо Ti, Cu та Cr, які є добре відомими ключовими індикаторами зносу гальм. Однак міський пил був більш забруднений, ніж пил автомагістралей. Тому було зроблено висновок, що знос гальмівних накладок і шин значною мірою сприяє забрудненню дорожнього пилю.

У [3] (135 цитувань) представлено Gravity, переносний тактильний пристрій, призначений для імітації сили і ваги опору кінестатичної накладки, що протидіє захопленню віртуальних об'єктів у віртуальній реальності (VR). Пристрій кріпиться на вказівний і великий палець і забезпечує точні захоплення з широким діапазоном рухів. Однонаправлене гальмо створює жорсткий зворотний зв'язок з силою захоплення. Два приводи звукової котушки створюють віртуальну силу, дотичну до кожної накладки пальця за рахунок асиметричної деформації шкіри. Ці сили можна сприймати як гравітаційні та інерційні сили віртуальних об'єктів. Обертальна орієнтація приводів звукової котушки пасивно узгоджується з реальним напрямком сили тяжіння через поворотне з'єднання, завдяки чому віртуальні сили завжди спрямовані вниз. Праця [3] оцінює продуктивність Gravity за допомогою двох користувацьких досліджень, знаходячи багатообіцяючу здатність імітувати різні рівні сили з переконливою жорсткістю об'єкта. Перше дослідження показує, що Gravity може передавати користувачам різні величини і відчуття сили, маніпулюючи амплітудою асиметричної вібрації. Друге дослідження показує, що користувачі можуть розрізняти різні ваги у віртуальному середовищі за допомогою Gravity.

Wolverine – це мобільний переносний тактильний пристрій, розроблений для імітації захоплення твердих об'єктів в інтерфейсі віртуальної реальності. На відміну від роботи над рукавичками зі зворотним силовим зв'язком, у [4] (126 цитувань) зосередились на створенні недорогого та легкого пристрою, який передає силу безпосередньо між великим і трьома пальцями, для імітації об'єктів, утримуваних в накладних (точних) захопленнях. Завдяки малопотужним блокуючим повзункам на основі гальма, система може витримувати силу понад 100 Н між кожним пальцем і великим пальцем і споживає лише 0,24 мВт·год (0,87 Дж) на кожне гальмування. Вбудовані датчики використовуються як для керування зворотним зв'язком, так і для введення користувачем: датчики часу прольоту забезпечують положення кожного пальця, а IMU забезпечує загальне відстеження орієнтації. У [4] описано механічну конструкцію, стратегію керування та аналіз продуктивності системи Wolverine, а також наведено порівняння з кількома існуючими переносними тактильними пристроями.

Концентрації міді, цинку та елементів платинової групи (PGE) у відкладеннях у багатьох міських районах постійно збільшується через розростання міст та збільшення кількості і відстані руху транспортних засобів. Знос гальмівних колодок і шин є основним джерелом міді та цинку в міському дорожньому пилю. PGE вивільняються з каталітичних нейтралізаторів з середини 1970-х років. Забруднений міський дорожній пил збирається зливовими стоками та потрапляє в місцеві водойми (наприклад, струмки, річки, озера та лимани). Концентрації цих металів у водоймах і осадах, що отримують зливні стоки із густонаселених міських районів, достатньо високі, щоб нанести шкоду водним організмам і часто перевищують критерії якості води та рекомендації щодо якості осадів. Щоб покращити якість міських водойм, необхідні законодавчі норми для зменшення викидів токсичних металів під час використання транспортних засобів, як це продемонстровано в [5] (105 цитувань) у випадку свинцю в бензині. Останні нормативні акти та угода про зниження вмісту міді в гальмівних колодках до 0,5 % до 2026 року в США повинні призвести до значного скорочення надходження міді в міські водойми. Менш оптимальним варіантом є видалення завислих відкладень із зливного стоку перед тим, як вони потраплять у приймальні водойми, використовуючи найкращі методи управління, такі як відстійні ставки, резервуари для затримання та трав'яні болота.

У дослідженні [6] (99 цитувань) нещодавно розроблений мідно-металевий матричний композит (Cu-ММС) для гальмівних колодок високошвидкісних поїздів був виготовлений

методом порошкової металургії. Досліджено мікроструктуру та механічні властивості Cu-ММС. Cu-ММС було трибооцінено на повномасштабному динамометрі, і особливу увагу було приділено характеристикам гальмування під час екстреного гальмування при початкових швидкостях від 300 до 380 км/год. Дослідження та аналіз зношеної поверхні та підповерхневого шару підтвердили механізм зносу. Результати показують, що Cu-ММС володіє відмінними властивостями та може відповідати технічним вимогам, тому він має великі перспективи для застосування у високошвидкісних поїздах.

У [7] (99 цитувань) була зроблена спроба в поєднанні з технологіями лазерного наплавлення та лазерного переплаву розробити покриття з високоентропійного сплаву Ni-Cr-Co-Ti-V. Детально досліджено фазовий склад, мікроструктуру, мікротвердість і зносостійкість (тертя кочення). Результати показують, що після лазерного переплавлення фазовий склад залишається незмінним, тобто покриття в стані після плакування і покриття після переплавлення складаються з інтерметалічної сполуки (Ni, Co)Ti₂, фази, багатої Ti і фази твердого розчину ОЦК (ВСС). Однак після лазерного переплаву об'ємна частка багатої титаном фази значно зростає. Крім того, підвищується мікротвердість до ~900 HV при параметрах лазерного переплаву: потужність лазера 1 кВт, діаметр лазерної плями 3 мм, швидкість лазера 10 мм/с. Порівняно з покриттям із високоентропійного сплаву після плакування, покриття з високоентропійного сплаву після повторного плавлення мають високий коефіцієнт тертя та низьку втрату маси при зносі, що вказує на те, що зносостійкість переплавлених покриттів покращено та пропонує практичне застосування, як покриття на гальмівних колодках для захисту від зносу. Морфологія зношеної поверхні показує, що механізм зношування плакованих і розплавлених покриттів із високоентропійних сплавів є адгезійним.

Щоб виміряти коефіцієнти масових викидів аерозольних частинок зносу гальм (PM; тобто частинок зносу гальм) на основі відстані проїзду, пов'язаних із тертям безазбестових органічних матеріалів гальмівної систем (колодок і накладок), і охарактеризувати частинки зносу компонент гальм, був розроблений [8] (99 цитувань) динамометр зносу гальм з системою відбору проб постійного об'єму. Лише обмежена кількість досліджень вивчалися викиди при гальмуванні в міських їздових циклах, які відповідають випробуванню на викиди вихлопних газів (тобто режим JC08 або JE05 японських циклів випробувань на викиди вихлопних газів). Спостережувані викиди частинок зносу гальм у повітрі коливалися від 0,04 до 1,4 мг/км/автомобіль для PM10 (частинки розміром до 10 мкм) і від 0,04 до 1,2 мг/км/автомобіль для PM2,5. Частка зносу гальм становила 2-21 % від маси зношування, що виділяється у вигляді аерозольних частинок зношування гальм, кисневі вуглецеві компоненти були включені в бортовий PM, але не в початковий фрикційний матеріал, що вказує на те, що в процесі стирання відбулися зміни у складі вуглецю. Крім того, це дослідження виявило ключові індикатори частинок зносу гальм (наприклад, Fe, Cu, Ba та Sb) на рівнях викидів, порівнянних з атмосферним середовищем, пов'язаним з дорожнім рухом.

У [9] (98 цитувань) було досліджено трибологічну поведінку комерційного матеріалу гальмівних колодок, випробованого на знос в умовах сухого ковзання по чавунному протилежному диску з допомогою пристрою «штифт-на-диску». Випробування на знос проводилися при температурах диска: 25 °C, 170 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C і 350 °C. Вище 170 °C спостерігався перехід від легкого до сильного зносу. При 25 °C і 170 °C шар тертя на поверхні штифта складався з первинного та ущільненого вторинного плато. При 200 °C і вище спостерігалось прогресуюче зменшення покриття поверхні штифта вторинними плато, які майже не присутні після випробування при 350 °C. Сліди зносу на дисках виникають від фрагментів зносу внаслідок трибоокислення самого диска та зносу матеріалу штифта. На спостережувану трибологічну поведінку значною мірою впливає термічна деградація фенольного сполучного фрикційного матеріалу, підтверджена термогравіметричними аналізами, спеціально проведеними на матеріалі штифта. Раманівська спектроскопія показала наявність вуглецевмісних продуктів на зношеній під високою температурою поверхні штифта. Хоча результати, отримані в цьому дослідженні, стосуються досить екстремальних і спрощених умов ковзання, вони дають корисні вказівки на роль термічної стабільності органічного компонента.

У [10] (84 цитування) на виготовлених гальмівних колодках на основі цементного пічного пилу (СКД), наповненого різними смолами (пряма фенольна, рідина з шкаралупи горіхів кешью (CNSL), модифікована лляною олією, модифікована алкілбензолом) було охарактеризовано їхні фізичні, механічні та трибологічні властивості. Трибо-характеристики виготовлених композитів гальмівних колодок оцінювали на фрикційному тестері типу Krauss відповідно до норм ЕСЕ R-90 (Регламент Європейської економічної комісії-90). Експериментальні результати показали, що

комбінація СКД і прямої фенольної смоли виявилася найкращою з точки зору коефіцієнта тертя, стабільності тертя та флуктуацій тертя, але гіршою за характеристиками зносу та зручності контакту. Комбінації СКД і смоли, модифікованої CNSL/ляною олією, були найбільш ефективними для підвищення характеристик відновлення та зношування, а також зменшення зміноного тертя. Композити з СКД і алкілбензолною модифікованою смолою показала найкращі характеристики вицвітання та зручність нанесення на поверхню. Отримані результати розглядалися як критерії, і підхід аналізу відношень сірого (GRA) використовувався для визначення повного ранжування складу гальмівних колодок. Результати також показали, що композит СКД з фенольною смолою прямої дії демонструє оптимальні властивості.

У дослідженні [11] (81 цитування) використовувалися оптична мікроскопія, конфокальна лазерна скануюча мікроскопія (CLSM), мікроіндентація та сегментація зображення для дослідження різних структур, існуючих на зношеній поверхні безазбестової органічної (NAO) і низькометалевої (LM) гальмівної колодки. На поверхнях досліджуваних накладок були ідентифіковані наступні структури: (i) деформівні та недеформівні первинні плато, (ii) вторинні контактні плато, утворені з підтримкою та без підтримки структурних компонентів накладки (первинні плато), та (iii) «пружне нагр'я». Ця остання структура залишається у високому положенні на топографії поверхні колодки та дуже гнучко реагує на прикладені навантаження. Нарешті, у статті [11] обговорюється кореляція між тертям і структурами, виявленими на поверхнях колодок.

Найвагоміші результати досліджень світових науковців опубліковано у авторитетних виданнях (табл. 2).

Табл. 2.

Порівняльна характеристика джерела публікацій світових досліджень в області «гальмівні накладки» (brake pads)

1957-2022 pp.		2016-2022 pp.
<i>SAE Technical Papers</i> , US (Q3 0,3) <i>Wear</i> , Netherlands (Q1 1,15) <i>Tribology International</i> , UK (Q1 1,46) <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i> , UK (0,25) <i>Materials Today: Proceedings</i> , UK (0,36) <i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering</i> , UK (Q2 0,53) <i>SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems</i> , US (Q3 0,22) <i>Journal of Sound and Vibration</i> , US (Q1 1,35) <i>Industrial Lubrication and Tribology</i> , UK (Q2 0,4) <i>AIP Conference Proceedings</i> , US (0,19)	Най-популярніші, країна (SJR)	<i>SAE Technical Papers</i> , US (Q3 0,3) <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i> , UK (0,25) <i>Materials Today: Proceedings</i> , UK (0,36) <i>Wear</i> , Netherlands (Q1 1,15) <i>Tribology International</i> , UK (Q1 1,46) <i>Journal of Physics: Conference Series</i> , UK (0,21) <i>Industrial Lubrication and Tribology</i> , UK (Q2 0,4) <i>AIP Conference Proceedings</i> , US (0,19) <i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering</i> , UK (Q2 0,53) <i>ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)</i> , US
<i>Environmental Science and Technology</i> , US (Q1 2,7) <i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering</i> , UK (Q2 0,53) <i>Wear</i> , Netherlands (Q1 1,15) <i>Tribology International</i> , UK (Q1 1,46) <i>Atmospheric Environment</i> , UK (Q1 1,38) <i>Advanced Engineering Materials</i> , Germany (Q1 0,9) <i>Environmental Monitoring and Assessment</i> , Netherlands (Q2 0,62) <i>Environmental Pollution</i> , UK (Q1 1,95) <i>Mechanical Systems and Signal Processing</i> , US (Q1 2,77)	Най-цитованіші, країна (SJR)	<i>Environmental Monitoring and Assessment</i> , Netherlands (Q2 0,62) <i>UIST 2017 - Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology</i> , US <i>IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems</i> , US (1,12) <i>International Journal of Urban Sciences</i> , UK (Q2 0,53) <i>Tribology International</i> , UK (Q1 1,46) <i>Optics and Laser Technology</i> , UK (Q1 0,85) <i>Atmospheric Environment</i> , UK (Q1 1,38) <i>Wear</i> , Netherlands (Q1 1,15) <i>Materials and Design</i> , Netherlands (Q1 1,8)

Найбільшу кількість водночас, як за 1957-2022 pp. так і за 2016-2022 pp., опубліковано у журналах (табл. 2, рядок 1): *SAE Technical Papers* (SJR 0,3), *Materials Today: Proceedings* (SJR

0,36), *Industrial Lubrication and Tribology* (SJR 0,4) тощо, які є традиційно найпопулярнішими для світових фахівців даного напрямку досліджень. Тоді як найбільш цитовані статті опубліковані у топових Q1 (з високим SJR) журналах (табл. 2, рядок 1): *Environmental Science and Technology* (SJR 2,7), *Atmospheric Environment* (SJR 1,38), *Advanced Engineering Materials*, (SJR 0,9), *Environmental Pollution* (SJR 1,95), *Mechanical Systems and Signal Processing* (SJR 2,77), *Materials and Design* (SJR 1,18) тощо. А журнали, такі як: *Wear* (SJR 1,15), *Tribology International* (SJR 1,46), *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* (SJR 0,53), водночас є як найбільш популярні так і цитованими. Також, значна кількість публікацій видана не лише у топових журналах, але й у великій кількості матеріалів конференцій, таких як *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (SJR 0,25), *AIP Conference Proceedings* (SJR 0,19), *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)* і є часто цитовані – *UIST 2017 - Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, що вказує на важливість участі науковців у роботі таких заходів, зокрема представлення на них своїх результатів.

Важливим аспектом сучасних досліджень є формування наукових колективів, із підбором і залученням фахівців з різних галузей знань, для забезпечення комплексних результатів. Тому цікавими і важливими є результати аналізу за галуззю знань, з якою позиціонується певна публікація. Для світових публікацій пов'язаних з «Гальмівні колодки», як за весь час (1957-2022 рр.), так і в останні роки (2016-2022 рр.), переважаючими є галузі: «Інженерія», «Матеріалознавство», «Фізика та астрономія», «Екологія» і «Комп'ютерні науки» (рис. 2).

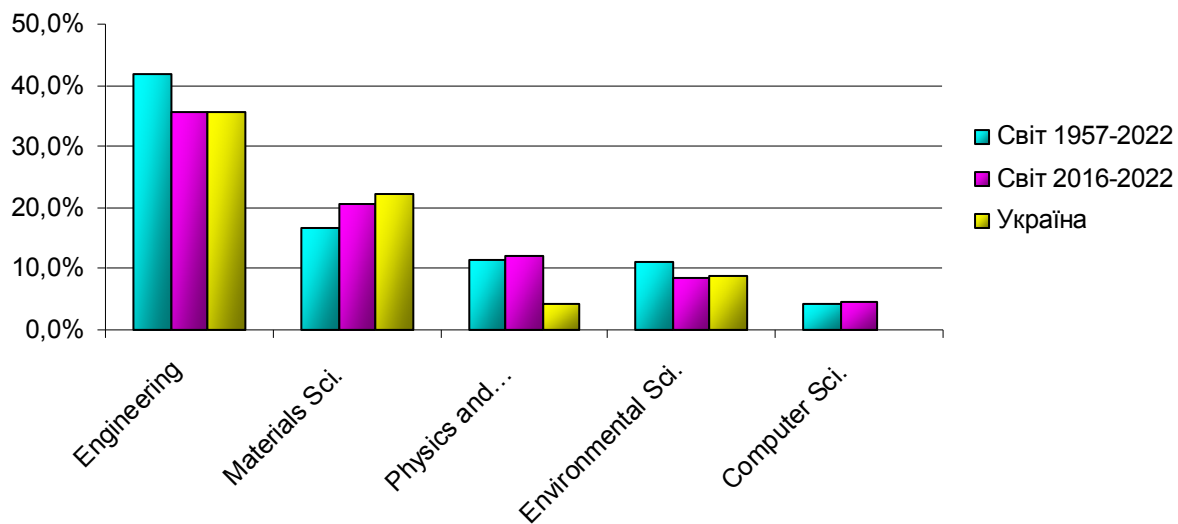


Рис. 1. Переважаючі галузі знань публікацій з «гальмівні накладки» (brake pads)

Хоча загальна тенденція і зберігається впродовж років, однак, дещо вищі світові відсоткові значення кількості публікацій за 1957-2022 рр. проти 2016-2022 рр. пов'язаних з галузями знань «Інженерія» (41,8 проти 35,7 %) і «Екологія» (11,2 проти 8,5 %). Тоді як для «Матеріалознавство» ситуація протилежна (16,7 проти 20,5 %) і майже незмінна для галузей «Фізика та астрономія» (11,4 і 12 %) та «Комп'ютерні науки» (4,1 і 4,5 %). Лідерство «Інженерії» вказує на те, що відповідні дослідження більше інтегровані саме до конкретних областей інженерії і перейшли у практичне русло, яке пов'язане з матеріалознавством чи фізикою. Також є очевидними незначні зміни пріоритетів у напрямках досліджень, а саме зростаючий в останні роки інтерес науковців фундаментальних наук – матеріалознавців, фізиків і ІТ.

Для України переважаючі є майже усі ті ж галузі як у світі (рис. 1), лише з дещо іншими пріоритетами. Майже однакові значення для «Інженерія» (35,7 і 35,5 %) і «Екологія» (8,5 і 8,9 %) і дещо вищі для «Матеріалознавство» (20,5 проти 22,2 %). Однак значно вищі світові відсоткові значення кількості публікацій проти українських пов'язані з галузями знань «Фізика та астрономія» (12 проти 4,4 %) і «Комп'ютерні науки» (4,5 проти 0 %). Перевагу за кількістю публікацій галузі знань «Фізика та астрономія» і «Комп'ютерні науки» можна пояснити значним фундаментальним доробком і розвитком прикладних аспектів. Світові науковці намагаються знайти практичне застосування результатів своїх досліджень. Також, часто такі напрями

визначаються наявною матеріальною базою, розробленим програмним забезпеченням, або публікаціями у співпраці вчених з різних країн, де кожна наукова група чітко виконує свою частину роботи.

Висновки. Проведений порівняльний аналіз світових публікацій пов'язаних з вивченням проблем гальмівних накладок дає можливість зрозуміти, які сучасні виклики стоять перед науковцями і які можливі шляхи їх подолання. Однозначно, дана тематика є актуальною і потребує подальших комплексних наукових досліджень, як у фундаментальному так і прикладному аспектах. Наведена інформація і надані пропозиції в статті будуть корисним для українських фахівців, які займаються даним питаннями і дозволять правильно спрямувати свою наукову діяльність для ефективних шляхів розвитку цього напрямку і розв'язання дослідницьких проблем на рівні світових.

Список використаних джерел:

1. Імбіроч Н. Ю., Федосов С. А. Сучасні проблеми досліджень гальмівних систем в Україні. *Instrumentation and Metrology: Contemporary Issues, Trends* : Mater. V Ukrainian Sci. Conf., Oct. 20–22 2022, Lutsk, Ukraine. Lutsk : LNTU, 2022. P. 35–36.
2. Adamiec E., Jarosz-Krzemińska E., Wieszała R. Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts. *Environ. Monit. Assess.* 2016. Vol. 188, № 6. P. 369.
3. Choi I., Culbertson H., Miller M.R., et al. Gravity: A wearable haptic interface for simulating weight and grasping in virtual reality. *UIST 2017 - Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology.* 2017. P. 119–130.
4. Choi I., Hawkes E.W., Christensen D.L., et al. Wolverine: A wearable haptic interface for grasping in virtual reality. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2016-November, 7759169. 2016. P. 986–993.
5. Hwang H.-M., Fiala M.J., Park D., Wade T.L. Review of pollutants in urban road dust and stormwater runoff: part 1. Heavy metals released from vehicles. *Int. J. Urban Sci.* 2016. Vol. 20, № 3. P. 334–360.
6. Xiao Y., Zhang Z., Yao P., et al. Mechanical and tribological behaviors of copper metal matrix composites for brake pads used in high-speed trains. *Tribology Int.* 2018. Vol. 119. P. 585–592.
7. Cai Z., Cui X., Liu Z., et al. Microstructure and wear resistance of laser clad Ni-Cr-Co-Ti-V high-entropy alloy coating after laser remelting processing. *Opt. Laser Technol.* 2018. Vol. 99. P. 276–281.
8. Hagino H., Oyama M., Sasaki S. Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles. *Atmos. Environ.* 2016. Vol. 131. P. 269–278.
9. Verma P.C., Ciudin R., Bonfanti A., et al. Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material. *Wear.* 2016. Vol. 346-347. P. 56–65.
10. Singh T., Patnaik A., Chauhan R. Optimization of tribological properties of cement kiln dust-filled brake pad using grey relation analysis. *Mater. Des.* 2016. Vol. 89. P. 1335–1342.
11. Neis P.D., Ferreira N.F., Fekete G., et al. Towards a better understanding of the structures existing on the surface of brake pads. *Tribology Int.* 2017. Vol. 105. P. 135–147.