III МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ СТУДЕНТІВ І МОЛОДИХ ВЧЕНИХ **«ПРОБЛЕМИ ТА ІННОВАЦІЇ У РОЗВИТКУ ІНЖЕНЕРІЇ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТРАНСПОРТУ» /** III INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE OF STUDENTS AND YOUNG SCIENTISTS **«PROBLEMS AND INNOVATIONS IN THE DEVELOPMENT OF ENGINEERING, TECHNOLOGIES AND TRANSPORT»**

April 23-25, 2026
Khmelnytskyi

Problems and innovations in the development of engineering, technologies and transport: Collection of scientific works of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists, April 23-25, 2026 – Khmelnytskyi: KhNU, 2026. – 759 p.

Responsible for the publication: prof. Oleh Polishchuk.
Technical editing and desktop publishing: assoc. prof. Volodymyr Kurskoi

Reviewers:
M. Bonek, T. Buratowski, O. Chornyi, O. Dykha, M. Giergiel, B. Gitolendia, S. Horiashchenko, T. Kalaczynski, H. Kalda, V. Kharzhevskyi, O. Konoplova, M. Łazarska, M. Macko, A. Martyniuk, A. Mazurkiewicz, J. Musiał, V. Neimak, I. Panasiuk, J. Padgurskas, S. Pidhaichuk, J. Polański, O. Polishchuk, S. Posonskyi, V. Puts, N. Radek, M. Skyba, O. Synyuk, V. Shevelia, V. Tkachuk, T. Trocikowski, N. Zashchepkina, R. Zinko.

Materials are published based on originals provided by the authors, reviewed by a group of reviewers.

ISBN 966-1502-35-5

© «Khmelnytskyi National University», 2026

ЗМІСТ / CONTENTS

ІННОВАЦІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ, ЦИВІЛЬНІЙ ТА ЕКОЛОГІЧНІЙ БЕЗПЕЦІ/ INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING, CIVIL AND ENVIRONMENTAL SAFETY. 10

METHODOLOGY FOR FORMING THE CONTENT OF THE DISCIPLINE "THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS" FOR SPECIALTY A5.38 "VOCATIONAL EDUCATION (TRANSPORT)", Lukianiuk M., Zdorenko D., Oleksandrenko Y. 10

METODY OBLICZENIA SKAŻENIA PROMIENIOTWÓRCZEGO, Miziuk J., Kalda G. ..18

OCENA POZIOMU NARAŻENIA NA POLE ELEKTROMAGNETYCZNE NA STANOWISKACH PRACY, Kruger R., Kalda G.....27

ЕКОЛОГІЧНІ ПИТАННЯ УКРАЇНИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ДОСВІДУ ПЕРЕДОВИХ КРАЇН, Нестер А.А. Партика А.....36

DEGRADACJA AERODYNAMICZNA ŁOPAT TURBIN WIATROWYCH W AGRESYWNYM ŚRODOWISKU BAŁTYCKIM, Bartodziej H. 46

GOSPODARKA ŚCIEKOWA W POLSCE W KONTEKŚCIE ROZWOJU INFRASTRUKTURY I REDUKCJI ZANIECZYSZCZEŃ – ANALIZA DANYCH STATYSTYCZNYCH, Wilk A., Czarnota J.....52

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA BEZZAŁOGOWYCH STSTKÓW POWIETRZNYCH DO STARTU SZYBOWCÓW, Joskowska K., Bieńkowski P.....61

ZANIECZYSZCZENIE WÓD PODZIEMNYCH I POWIERZCHNIOWYCH W POLSCE, Ochab G., Kalda G.....68

ЕСТЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПРАЦЕХОРОННОЇ КУЛЬТУРИ У СИСТЕМІ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ, Романішина О., Ярушевський М.....75

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІДВІСКИ АВТОМОБІЛЯ З ЕЛЕМЕНТАМИ ЗМІННОЇ ЖОРСТКОСТІ, Пелех О.Р., Зінько Р.В. 82

MASTER UNIT DIE – ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ЗМІННИХ ВСТАВОК, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В УНІВЕРСАЛЬНИХ ПРЕС ФОРМАХ ДЛЯ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ, Гребенюк Б., Милько В.....88

3D-ДРУК ПЛАСТИКОВИХ ДЕТАЛЕЙ: ВИКЛИКИ ТА СТРАТЕГІЇ ПОСТОБРОБЛЕННЯ, Демчук Б., Драч І..... 93

МАТЕМАТИЧНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДІАГНОСТИКИ ДВИГУНА НА СТИСНЕНОМУ ПОВІТРІ, Мокряк Б., Зінько Р..... 99

ELIMINACJA MIKROPLASTIKU W PROCESIE KOAGULACJI - OPTYMALIZACJA PROCESU, Pilip K., Kalińska J., Ziembowicz S., Kida M.....107

INTELLIGENT AUTOMATION SYSTEMS IN MODERN PRINTING PRODUCTION - EFFICIENCY AND PERSPECTIVES, Baramashvili T., Baidoshvili O. 116

РОЗРОБКА РАДІОКЕРОВАНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ РОБІТ З РОЗМІНУВАННЯ, Боровик Д., Горященко С.....121

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЦИЛІНДРІВ ДВОТАКТНИХ ДВИГУНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЧПК ТА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ, О.М. Липка, С.А. Костюк.....125

EXPERIMENTAL SYSTEM FOR SOLID PARTICLE EROSION - DESIGN, DEVELOPMENT, AND ANALYSIS, Wawrzynek J., Szałaśny K., Słania K., Połap Ł., Markocki S., Figołuszka M., Bodziach B., Bujara D., Kremzer M., Tomiczek B. 132

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF ACCURACY OF CALCULATION METHODS THE DENSITY OF THE CHANNELS AND THE EQUIVALENT DIAMETER OF THE CHANNELS OF OIL-FREE CYLINDER-PISTON SEALS, Tymoshchuk O., Polishchuk O. , Struchok D. 139

ТРИБОЛОГІЧНІ І МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ПРОБЛЕМИ В ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТІ/ TRIBOLOGICAL AND MATERIALS SCIENCE ISSUES IN ENGINEERING AND TRANSPORT 148

ВИБІР МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ У КОНСТРУКЦІЯХ АВТОМОБІЛІВ, Свідерський В., Гладкий Н., Бонк Н. 148

УСУНЕННЯ ДЕФЕКТІВ ЦЕМЕНТАЦІЇ ТЕРМОЦИКЛІЧНОЮ ОБРОБКОЮ, Дробот О., Підгайчук С., Кухта К. 156

VIBRATION DIAGNOSTICS OF AUTOMOTIVE BALL JOINTS BASED ON SIGNAL PROCESSING METHODS, Lytvynov O. 161

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ВЕНТИЛЬОВАНИХ ДИСКОВИХ ГАЛЬМ ЛЕГКИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ, Панчишин Я., Горюха О., Диха О. 167

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОРШНІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ, Мондрич П., Посонський С. 174

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЯКОСТІ РОБОТИ ПРИЛАДІВ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ СУЧАСНИХ АВТОМОБІЛІВ, Невідомий В., Бабак О., Пасічник О., Посонський С. 178

КРИТЕРІЇ ЗАРОДЖЕННЯ ВТОМНИХ ТРІЩИН У РАДІАЛЬНИХ КУЛЬКОВИХ ПІДШИПНИКАХ: ПОРІВНЯННЯ КЛАСИЧНОГО ПІДХОДУ З ІНВАРІАНТНИМ J_2-I_1 КРИТЕРІЄМ, Кучерук М., Драч І. 184

WPŁYW OBRÓBKI KONWENCJONALNEJ NA CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI STOPÓW CYRKONU W ZASTOSOWANIACH MEDYCZNYCH – STAN BADAŃ I PERSPEKTYWY, Troszyński A. 192

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ СПОЙЛЕРІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ, Погурало А., Посонський С. 202

ДИНАМІЧНІ ЗУСИЛЛЯ В НЕСУЧОМУ КАНАТІ З ПРУЖНО ПОДАТЛИВИМИ ОПОРАМИ НА РІЗНИХ РІВНЯХ ПРИ РАПТОВОМУ ОБРИВІ СТРОПИ ТА ВІДРИВІ ПРИМЕРЗЛОГО ВАНТАЖУ, Слєпко Т., Диха О., Каплун П., Драч І. 206

ВПЛИВ СКЛАДУ МАТЕРІАЛІВ ТА ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ В УМОВАХ ЗМІШАНОГО МАЩЕННЯ, Каплун П., Чебан М., Лісовий Я..... 213

WPŁYW SKŁADU CHEMICZNEGO NA ZDOLNOŚĆ DO ZESZKLENIA I TWARDOŚĆ WYBRANYCH STOPÓW Z UKŁADU Fe-Cr-Mo-B-C WYTWORZONYCH METODĄ MELT SPINNING, Górski K., Kredowska I., Pilarczyk W. 218

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО КОНСТРУКЦІЇ ТА МАТЕРІАЛІВ ДИТЯЧИХ АВТОМОБІЛЬНИХ КРІСЕЛ, Бідюк В., Посонський С.. 227

WPŁYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH DRUKU 3D NA TOPOGRAFIĘ POWIERZCHNI STOPÓW CYRKONU WYKORZYSTYWANYCH W MEDYCYNIE – ANALIZA STANU BADAŃ, Musiał J., Troszyński A., Zasińska K. 232

РОЗРАХУНОК І ВСТАНОВЛЕННЯ МАРКЕРІВ І СЛІДОПОКАЖЧИКІВ НА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІЙ ТЕХНІЦІ, Ярошенко П., Потапчук Н. 365

СПЕЦИФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТРАНСПОРТНИХ РОБІТ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ, Ярошенко П. 370

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИГНУТИХ ПРОФІЛІВ ГВИНТОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ШНЕКОВИХ МЕХАНІЗМІВ, Гупка А., Ткаченко І., Лещук Р., Тесля В. 376

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ/ COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS AND COMPUTER MODELLING 385

ДОСТАВКА ЗАМОВЛЕНЬ ТРАНСПОРТНИМИ ОДИНИЦЯМИ (ДРОНАМИ) У ДИНАМІЧНІЙ МЕРЕЖІ, Міхалевський В., Скрипник Т., Олійник І., Медведчук В. .. 385

ТЕХНОЛОГІЧНА ІЄРАРХІЯ ЗАСОБІВ 3D-СКАНУВАННЯ ТІЛА ЛЮДИНИ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ ОДЯГУ, Мица В., Щербакова А. 394

СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕРЕЖЕВИХ ЗАСТОСУНКІВ, Пасічник О., Бабак О., Скрипник Т., Пивовар О. 399

МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ КОНСТРУКЦІЇ МЕТАЛЕВОГО НАВІСУ ДЛЯ АВТОМОБІЛІВ В SOLIDWORKS SIMULATION, Тадля О., Соколан К. 405

INFLUENCE OF POWER CABLE CONDUCTOR TEMPERATURE ON THE MINIMUM SHORT-CIRCUIT CURRENT AND THE OPERATING CONDITIONS OF OVERCURRENT PROTECTION, Nowak K. 411

DEVELOPMENT OF PRELIMINARY DESIGN ASSUMPTIONS FOR AN ARMORY USING INTERNET OF THINGS (IOT) SOLUTIONS, Żuchowski D., Pilarski J. 422

DEVELOPMENT OF A DESIGN FOR AN AUTOMATED ARMORY USING INTERNET OF THINGS (IOT) SOLUTIONS WITH IMPLEMENTATION IN ZWSI RON, Pilarski J., Żuchowski D. 429

AUTOMATED DESIGN AND COMPUTER MODELING OF A STEERING ARM PULLER, Rudyk O., Dumanskyi O., Shapovalov O. 438

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ В SOLIDWORKS, Одошевський О. 444

DESIGN OPTIMIZATION OF AN AUTOMOTIVE JACK STAND USING THE FINITE ELEMENT METHOD IN SOLIDWORKS SIMULATION, Sviatushenko M. 450

OPTIMIZATION OF SEDIMENTATION PROCESSES USING CFD METHODS, Marchenko M., Kharzhevskyi V., Terletskyi O. 455

ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РАМИ БПЛА НА ОСНОВІ ДАНИХ MEMS-АКСЕЛЕРОМЕТРА ТА МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, Бойко Ю., Свачій О. 459

РОЗШИРЕНІ МОЖЛИВОСТІ MOLDEX3D 2026 ДЛЯ СИМУЛЯЦІЇ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ, Поліщук О., Поліщук А., Кунцов О., Синюк О., Мазуркевич А. 468

СУЧАСНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА, МЕХАТРОНІКА ТА РОБОТОТЕХНІКА/ ADVANCED MANUFACTURING AUTOMATION, MECHATRONICS AND ROBOTICS 478

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА БЕЗПЕКИ ВІД ВОДІННЯ У НЕТВЕРЕЗОМУ СТАНІ, Дейнека Д., Соколан Ю., Макаришкін Д., Майдан П. 478

РОЛĄCZENIE CAŁKOWANIA NUMERYCZNEGO I SIECI PINN W ANALIZIE DYNAMIKI LOTU, Gryt P.....689

ДЕЯКІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ НА ОСНОВІ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ, Соломяний Є., Горященко С., Смолій Д.....697

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МІКРОФІЛЬТРАЦІЇ РОЗСОЛУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СИРНИХ МАС, Цимбалюк Ю. , Мартинюк А., Федорів В.....702

КОМП'ЮТЕРНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ СИСТЕМ, Гарбар Є., Марчук В.....709

КОНСИСТЕНТНО-КЕРОВАНА БІНАРИЗАЦІЇ IBSI-ОЗНАК ДЛЯ ІНТЕРПРЕТОВАНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ПУХЛИН МОЗКУ, Кириченко О., Манзюк Е.....712

ЕКОНОМІЧНІ ВИКЛИКИ ТА УПРАВЛІНСЬКІ ІННОВАЦІЇ В ІНЖЕНЕРІЇ, ТЕХНОЛОГІЯХ І ТРАНСПОРТІ/ ECONOMIC CHALLENGES AND MANAGERIAL INNOVATIONS IN ENGINEERING, TECHNOLOGY AND TRANSPORT.....720

EFFICIENCY ANALYSIS AND DEVELOPMENT STRATEGIES FOR URBAN PASSENGER TRANSPORT IN KHMELNYTSKYI, Shapovalov O., Posonskiy S., Babak O. 720

ZARZĄDZANIE RYZYKIEM TRANSPORTU OGNIW LITOWO-JONOWYCH JAKO WYZWANIE EKONOMICZNE I TECHNOLOGICZNE W TRANSPORCIE LOTNICZYM, Bezuch K., Kaczor M., Zych N. 723

MOŻLIWOŚCI REALIZACJI PROJEKTÓW ZAKUPU AUTOBUSÓW NISKOEMISYJNYCH ZE ŚRODKÓW UNII EUROPEJSKIEJ, ... Jakubiec J., Mateichyk V. 733

ADAPTACJA METODYK ZWINNYCH (AGILE) W ZARZĄDZANIU PROJEKTAMI INŻYNIERYJNYMI W DOBIE PRZEMYSŁU 4.0, Szuper K. 739

ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ MOBILNOŚCI MIEJSKIEJ PRZEZ USPRAWNIENIE FLOTY TRANSPORTU PUBLICZNEGO, Piziorski W., Mateichyk V. 745

JAK ALGORYTMY AI OPTYMALIZUJĄ PRZYCHODY LINII LOTNICZYCH, M. Maćkowiak.....751

NIEDOBÓR KIEROWCÓW ZAWODOWYCH A WSKAŹNIK LOAD-TO-TRUCK RATIO NA EUROPEJSKIM RYNKU TRANSPORTU DROGOWEGO W LATACH 2022–2025, Zagórska A. 755

3D-ДРУК ПЛАСТИКОВИХ ДЕТАЛЕЙ: ВИКЛИКИ ТА СТРАТЕГІЇ ПОСТОБРОБЛЕННЯ

Демчук Б. В., Драч І. В.
Хмельницький національний університет, Україна

Анотація

У даній роботі проведено комплексний аналіз сучасного стану та перспектив застосування адитивних технологій, зокрема методу моделювання шляхом наплавлення (FDM) у промисловому виробництві. Розглянуто роль 3D-друку як інструменту для швидкого створення прототипів та виготовлення функціональних вузлів, що дозволяє суттєво оптимізувати витрати на логістику та обслуговування обладнання у віддалених локаціях. Основну увагу приділено розбору структурних недоліків, які притаманні виробам, виготовленим пошаровим нанесенням термопластів. Висвітлено природу виникнення механічної анізотропії, внутрішньої пористості та дефектів міжшарової адгезії, що безпосередньо впливають на експлуатаційний ресурс деталей. Встановлено, що через нерівномірне термічне охолодження та специфіку екструзії, друковані об'єкти часто мають внутрішні концентратори напружень, які роблять їх вразливими до розшарування та деформацій під навантаженням.

Окремий розділ присвячено дослідженню ефективності різних методів постоброблення як ключового етапу перетворення сирого прототипу на надійний конструкційний елемент. У статті систематизовано дані щодо термічного відпалу, хімічного розгладжування парами розчинників, механічного зміцнення та інноваційних підходів, таких як холодний ізостатичний тиск та повне переплавлення у соляних формах. Детально проаналізовано вплив температурних режимів на дифузію молекул полімеру, що дозволяє значно підвищити міцність виробів із ABS та спеціальних композитів. Наведено результати успішного застосування хімічної обробки дихлорметаном та бензиловим спиртом для радикального зниження шорсткості поверхні PLA та поліамідів до мікрорівня, що відкриває шлях до використання пластикових вставок навіть у процесах лиття під тиском. Особливу цінність мають висновки щодо усунення анізотропії в композитних матеріалах, армованих вуглецевим волокном, де поєднання високого тиску та контрольованого нагріву дозволяє досягти монолітної структури, порівнянної за властивостями з промисловим литтям. Робота демонструє, що інтеграція адитивного виробництва з науково обґрунтованими методами фінішної обробки дозволяє нівелювати більшість технологічних обмежень 3D-друку, забезпечуючи отримання точних, міцних та довговічних деталей для потреб сучасного машинобудування та енергетики.

Ключові слова

3D-друк, полімери, міжшарові властивості, постоброблення, механічна міцність.

3D PRINTING OF PLASTIC PARTS: CHALLENGES AND POST-PROCESSING STRATEGIES

Demchuk B. V., Drach I. V.
Khmelnytskyi National University, Ukraine

Abstract

In this work, a comprehensive analysis of the current state and prospects of the application of additive technologies, in particular the Fused Deposition Modeling (FDM) method in industrial production, is conducted. The role of 3D printing as a tool for the rapid creation of prototypes and the manufacture of functional units is considered, which allows for a significant optimization of costs for logistics and maintenance of equipment in remote locations. The main attention is paid to the analysis of structural defects inherent in products manufactured by layer-by-layer deposition of thermoplastics. The nature of the emergence of mechanical anisotropy, internal porosity, and defects in interlayer adhesion, which directly affect the operational resource of parts, is highlighted. It has been established that due to non-uniform thermal cooling and the specifics of extrusion, printed objects often have internal stress concentrators that make them vulnerable to delamination and deformation under load.

A separate section is devoted to the study of the effectiveness of various post-processing methods as a key stage in the transformation of a raw prototype into a reliable structural element. The article systematizes data on thermal annealing, chemical smoothing by solvent vapors, mechanical strengthening, and innovative approaches such as cold isostatic pressure and complete remelting in salt molds. The influence of temperature regimes on the diffusion of polymer molecules is analyzed in detail, which allows for a significant increase in the strength of products made of ABS and special composites. The results of the successful application of chemical treatment with dichloromethane and benzyl alcohol for a radical reduction in the surface roughness of PLA and polyamides to the micro-level are presented, which opens the way for the use of plastic inserts even in injection molding processes. Of

particular value are the conclusions regarding the elimination of anisotropy in composite materials reinforced with carbon fiber, where the combination of high pressure and controlled heating allows achieving a monolithic structure comparable in properties to industrial casting. The work demonstrates that the integration of additive manufacturing with scientifically grounded finishing methods allows for the leveling of most technological limitations of 3D printing, ensuring the production of accurate, strong, and durable parts for the needs of modern mechanical engineering and energy.

Keywords

3d printing, polymers, interlayer properties, post-processing, mechanical strength.

1. Вступ

Адитивне виробництво, більш відоме як 3D-друк, сьогодні є важливим елементом розвитку сучасної промисловості, пропонуючи новий підхід до створення об’єктів шляхом пошарового нанесення матеріалу. На відміну від традиційних методів обробки, ця технологія дозволяє виготовляти деталі складної геометричної форми, поєднувати кілька функціональних елементів в одну конструкцію та зменшувати масу готових виробів [1, 2]. Сучасний ринок пропонує різні методи друку, серед яких найбільш поширеними є екструзія матеріалу (FDM/FFF), фотополімеризація (SLA/DLP) та порошкове злиття [1]. Завдяки доступності та відносно невисокій вартості обладнання, технологія моделювання методом наплавлення (FDM) стала однією з найпопулярніших для роботи з полімерами, особливо у швидкому прототипуванні та дрібносерійному виробництві.

Спектр матеріалів, що використовуються у 3D-друці, постійно розширюється та включає як стандартні термопласти (PLA, ABS, PETG), так і композитні матеріали з вуглецевим армуванням [3]. Вибір філаменту безпосередньо впливає на сферу застосування виробу: від побутових деталей до компонентів у медицині, де важливою є біосумісність матеріалів та відсутність токсичності [3, 4]. Універсальність пластиків разом із можливістю налаштування параметрів друку, таких як температура екструзії та швидкість руху сопла, дозволяє адаптувати процес під конкретні умови експлуатації.

Актуальність 3D-друку пластикових деталей зумовлена можливістю швидко адаптувати виробництво до технічних вимог без значних витрат. Адитивні технології стають ефективним інструментом оптимізації логістики, дозволяючи впроваджувати моделі децентралізованого виготовлення. Це критично для галузей, що працюють у віддалених умовах, де традиційні ланцюги постачання є надто повільними. Створення виробів безпосередньо на місці експлуатації суттєво скорочує час простою обладнання та мінімізує витрати на утримання складських запасів. Досвід розробки складних функціональних вузлів підтверджує, що сучасні полімерні деталі забезпечують стабільні характеристики навіть у складних умовах, успішно замінюючи металеві аналоги [4].

Проте використання друкованих деталей у практичних задачах потребує забезпечення достатньої точності та довговічності. Встановлено, що механічні властивості полімерних виробів значною мірою залежать від режимів друку та якості зчеплення між шарами [3, 1]. Оскільки технологія FDM має виражену анізотропію, отримання стабільних показників міцності залишається важливим завданням [3]. Використання систем моніторингу та датчиків контролю параметрів у реальному часі дозволяє покращити якість виробів, однак забезпечення їхньої довготривалої надійності потребує комплексного підходу до вибору матеріалів, налаштування технологічних режимів друку та проведення постоброблення друкованих деталей.

2. Аналіз ключових недоліків виробів, отриманих методом адитивного виробництва

Широке впровадження технології моделювання методом наплавлення (FDM) для виготовлення функціональних деталей сьогодні суттєво обмежується низкою структурних недосконалостей, які виникають безпосередньо під час формування об'єкта. Однією з найважливіших проблем є анізотропія механічних властивостей, що зумовлена пошаровим характером побудови. Міцність виробу критично залежить від орієнтації ліній

друку: експериментально доведено, що при навантаженні вздовж шарів (кут розстру 0°) деталі демонструють на 40% вищі показники, ніж при перпендикулярному прикладанні сили [5]. Це пояснюється тим, що межа розділу між шарами виступає як “слабка ланка”, де найчастіше відбувається руйнування через недостатню молекулярну дифузію полімеру. Навіть при використанні поширених матеріалів, таких як ABS або PLA, міцність друкованих зразків часто не досягає показників литих аналогів саме через неповне спікання сусідніх волокон [6]. Крім того, на загальну стійкість конструкції впливає обраний відсоток заповнення та його геометрія: занадто низька щільність заповнення хоч і економить матеріал, проте створює внутрішні концентратори напружень, що знижує загальну жорсткість [7].

Пористість та наявність внутрішніх порожнин є дефектами, які напряму впливають на довговічність та щільність виробів. У процесі екструзії між сусідніми доріжками матеріалу неминуче утворюються мікроскопічні пустоти трикутної або ромбовидної форми. За допомогою мікрокомп’ютерної томографії встановлено, що об’єм таких дефектів може зростати з 7% до 25% лише через неправильно підібрану швидкість подачі філаменту [8]. Внутрішні пустоти стають місцем зародження тріщин, а специфічне явище неповної екструзії (рис. 1), що виникає через недостатній тиск у соплі, створює фізичні прогалини в структурі, що робить деталь непридатною для роботи під тиском. Важливо також враховувати стабільність плавлення: зниження температури екструзії погіршує здатність полімеру до “самозагоєння”, що призводить до зростання кількості пор [8, 5].

Рис. 1. Явище неповної екструзії.

Естетична привабливість та геометрична точність 3D-друкованих деталей часто страждають через високу шорсткість поверхні та термічні деформації. Виражена ступінчастість профілю є природним наслідком пошарового нанесення розплаву, де параметр Ra суттєво зростає при збільшенні товщини шару, роблячи поверхню візуально грубою [5]. Паралельно з цим, нерівномірне охолодження пластику призводить до виникнення значних внутрішніх напружень, що стає причиною термічної усадки (рис. 2). Це не лише порушує розмірну точність, а й призводить до явища відшарування шарів (рис. 3), коли крайні частини деталі піднімаються над робочою платформою або розділяються посередині об’єкта, що повністю нівелює функціональність виробу [6, 8].

У підсумку, сукупність таких факторів, як нерівності поверхні, внутрішня пористість та низька міжшарова адгезія, створює суттєві перешкоди для використання пластикових деталей у відповідальних інженерних вузлах. Розуміння механіки виникнення цих дефектів та їхнього зв'язку з параметрами друку є необхідним кроком до розробки стратегій покращення якості.

Рис. 2. Термічна усадка.

Рис. 3. Відшарування шарів.

3. Постоброблення виробів: основні способи підвищення якості

Проблеми якості 3D-друкованих деталей зумовлюють необхідність постоброблення. Існують різні способи покращення якості: від механічного шліфування й термічного відпалу до хімічного розчинення та пресування. Кожен метод має свої особливості застосування залежно від типу полімеру та вимог до готового виробу.

Одним з методів покращення поверхні PLA є термічне розгладжування нагрітою сферичною насадкою [9]. Інструменти радіусом до 9,6 мм перерозподіляли рельєф шляхом оплавлення піків при 230 °C. Це дозволило знизити шорсткість Ra з 3,15 мкм до 0,796 мкм, що відповідає шліфуванню. Головною перевагою є швидкість: використання широкого наконечника вчетверо швидше за стандартне розгладжування соплом. Технологія дозволяє отримувати гладкі функціональні деталі безпосередньо на принтері, повністю виключаючи потребу в додатковій хімічній або абразивній обробці.

Для зміцнення пластику, армованого вуглецевим волокном (sCFRP), у дослідженні [10] застосовано метод холодного ізостатичного пресування. На відміну від термічного відпалу, цей процес відбувається при кімнатній температурі в камері з рідиною під тиском до 1000 бар, що дозволяє уникнути деградації полімеру. Оптимальним виявився тиск 500 бар, який забезпечив приріст міцності на розрив до 143% та знизив анізотропію з 77,3% до 42,1%. Під дією рівномірного стискання внутрішні порожнечі між шарами майже повністю зникають, а адгезія волокон із матрицею посилюється. Метод дозволив підвищити ступінь кристалізації матеріалу, зберігши при цьому високу точність розмірів (відхилення до 3%). Така обробка є альтернативою гарячим методам, дозволяючи отримувати щільні та міцні композитні деталі без ризику термічної деформації.

Для зміцнення деталей з ABS у [11] проаналізовано термічний відпал при 90-120°C. Встановлено, що нагрівання до 105°C позитивно впливає на механіку: твердість та міцність на розрив зростають завдяки посиленню дифузії між шарами. Найкращий результат показали зразки із суцільним заповненням, їхня міцність зросла на 25%. Однак температура 120°C спричинила зворотний ефект – появу мікротріщин та розшарування. Це підтверджує важливість дотримання режиму: оптимальний відпал при 105°C суттєво підвищує надійність, тоді як перегрів призводить до крихкості та деформацій структури. Термічний метод постоброблення також було застосовано для зміцнення елементів теплових мереж виготовлених з композитів ASA-X CF10, PA6-GF30 та ePAHT-CF15 [12]. Особливу увагу приділено впливу відпалу на ePAHT-CF15 за умов експлуатації від 60 °C до 130 °C. Без термообробки полімери втрачають стабільність: у ASA-X CF10 при 100 °C міцність падає вдвічі, що критично для турбін. Проте відпал ePAHT-CF15 при 150–200 °C суттєво покращив показники: зріс модуль Юнга та межа міцності, а деформації зменшилися. Оптимальним вибором визнано ePAHT-CF15, відпалений при 200 °C. Він забезпечує жорсткість і стабільність, зберігаючи геометрію деталей та високий ККД системи навіть при 130 °C. Це підтверджує ефективність поєднання 3D-друку з наступною термообробкою для промислового обладнання.

Для покращення властивостей FDM-друку у дослідженні [13] застосували метод повного переплавлення виробів у формі з солі під тиском 10 бар. Дослідження проводилося на композиті WoodFill (суміш PLA та PHA) при температурі 185 градусів Цельсія. Гранульована сіль підтримувала геометрію деталі, поки полімер перебував у розплавленому стані, що дозволило ефективно ущільнити структуру. Обробка підвищила щільність матеріалу до рівня промислового лиття завдяки усуненню внутрішніх порожнеч. Головним результатом стало усунення анізотропії: механічні характеристики зрівнялися в усіх напрямках. Для поперечних зразків жорсткість зросла у 3,5 рази, а міцність – у 4,5 рази. Попри незначну усадку, цей підхід дозволяє перетворювати звичайні 3D-друковані прототипи на монолітні конструкційні деталі.

Дослідження [14] присвячене мінімізації “ефекту східців” на деталях із PLA. За допомогою методу Тагучі та аналізу ANOVA встановлено, що ключовим параметром, який впливає на шорсткість Ra, є товщина шару. Оптимальні результати отримано при шарі 0,1 мм та щільності заповнення 50%. Для покращення поверхні використано ацетон, етилацетат та дихлорметан. Найкращу здатність розчиняти нерівності PLA показав дихлорметан. Обробка його парами дозволила суттєво зменшити шорсткість з 10,71 мкм до 0,18 мкм. Такий метод забезпечує зниження шорсткості при мінімальних змінах розмірів, що важливо для виготовлення точних функціональних деталей.

Підвищення якості деталей із поліаміду (PA12 та PA12GB) досліджено в [15]. Основною проблемою таких виробів є висока початкова шорсткість (Ra понад 6 мкм), що обмежує їхнє функціональне використання. Автори порівняли ефективність механічного шліфування, металевого напилення та хімічного розгладжування парами. Найкращі результати показав метод обробки парами бензилового спирту. Шорсткість Ra знизилася до 1,28 мкм, що відповідає стандартам промислової шорсткості поверхні. При цьому товщина зміненого шару склала лише 1,7 мкм, що дозволило зберегти точність геометричних розмірів. Трибологічні випробування підтвердили, що така обробка суттєво підвищує зносостійкість матеріалу. Дослідження доводить, що правильно підібраний метод постоброблення дозволяє використовувати надруковані деталі як повноцінні функціональні елементи в умовах інтенсивного тертя та тиску.

Постоброблення дозволяє суттєво покращити властивості пластикових деталей: знизити шорсткість поверхні, підвищити міцність та усунути анізотропію. Комбінація різних підходів дає змогу отримувати вироби, які за своїми характеристиками наближаються до литих або оброблених деталей традиційними методами. При цьому важливо враховувати, що надмірна обробка може призвести до деформацій або зворотного ефекту, тому параметри процесу потрібно підбирати з урахуванням конкретного матеріалу та геометрії виробу.

4. Висновки

Проведений аналіз підтверджує, що сучасний 3D-друк методом наплавлення вже давно переріс стадію виготовлення лише візуальних макетів і став повноцінним інструментом для промислового виробництва. Головним викликом на цьому шляху залишається неоднорідність структури надрукованих деталей, зокрема їхня чутливість до напрямку прикладання навантаження та наявність внутрішніх мікропорожнин. Проаналізовані дослідження доводять, що більшість цих недоліків не є критичними для технології, а можуть бути успішно виправлені за допомогою правильно підібраних методів постоброблення.

Ключовим фактором у забезпеченні міцності та довговічності полімерних виробів є температурний контроль та механічний вплив після завершення друку. Зокрема, термічний відпал при оптимальних температурах (наприклад, 105°C для ABS) дозволяє суттєво посилити дифузію між шарами, що підвищує надійність вузлів на чверть. Інноваційні підходи, такі як холодне ізостатичне пресування або переплавлення у соляних формах під тиском, продемонстрували вражаючі результати у боротьбі з анізотропією. Ці

методи фактично стирають межі між шарами, перетворюючи пошарову конструкцію на монолітний виріб, який за своїми характеристиками не поступається виробам, отриманим методом традиційного промислового лиття.

Окреме значення має естетична та функціональна якість поверхні. Використання хімічного розгладжування парами дихлорметану або бензилового спирту дозволяє досягти зниження шорсткості у десятки разів при збереженні точних геометричних розмірів. Це робить можливим використання пластикових деталей навіть у точних механізмах. Таким чином, інтеграція 3D-друку з науково обґрунтованими методами фінішної обробки відкриває нові можливості для машинобудування та енергетики, дозволяючи створювати складні, легкі та водночас надміцні функціональні елементи безпосередньо на місці їхньої експлуатації.

Література

1. Klenam D.E.P., McBagonluri F., Asumadu T.K., Osafo S.A., Bodunrin M.O., Agyepong L., Osei E.D., Mornah D., Soboyejo W.O. (2025). *Additive manufacturing: shaping the future of the manufacturing industry – overview of trends, challenges and opportunities.* Applications in Engineering Science 22, 100224.

2. Peverini O.A., Lumia M., Addamo G., Virone G., Fonseca N.J.G. (2023). *How 3D-Printing Is Changing RF Front-End Design for Space Applications*. IEEE Journal of Microwaves 3(2), 800-814.

3. Pyka D., Słowiński J.J., Kurzawa A., Roszak M., Stachowicz M., Kazimierczak M., Stępczak M., Grygier D. (2024). *Research on Basic Properties of Polymers for Fused Deposition Modelling Technology.* Applied Sciences, 14(23), 11151.

4. Suárez-González J., Díaz-Torres E., Monzón-Rodríguez C.N., Santoveña-Estévez A., Fariña J.B. (2024). *Revolutionizing Three-Dimensional Printing: Enhancing Quality Assurance and Point-of-Care Integration through Instrumentation.* Pharmaceutics, 16(3), 408.

5. Gajjar T., Yang R.C., Ye L., Zhang Y.X. (2025). *Effects of key process parameters on tensile properties and interlayer bonding behavior of 3D printed PLA using fused filament fabrication.* Progress in Additive Manufacturing, 10, 1261–1280.

6. Fekiač J.J., Kakošová L., Krbata M., Kohutiar M., Eckert M., Studeny Z., Dubec A. (2025). *Influence of Infill Geometry and Density on the Mechanical Properties of 3D-Printed Polylactic Acid Structure.* Journal of Manufacturing and Materials Processing, 9(4), 134.

7. Petruse R.E., Simion C., Bondrea I. (2024). *Geometrical and Dimensional Deviations of Fused Deposition Modelling (FDM) Additive-Manufactured Parts.* Metrology, 4(3), 411–429.

8. Wu H., Chen X., Xu S., Zhao T. (2023) *Evolution of Manufacturing Defects of 3D-Printed Thermoplastic Composites with Processing Parameters: A Micro-CT Analysis.* Materials, 16(19), 6521.

9. Montalti A., Galiè G., Pignatelli E., Liverani A. (2024). *Enhancing surface roughness of material extrusion additive manufacturing components via an innovative ironing process.* Virtual and Physical Prototyping, 19(1), e2401929.

10. Jeon S., Park S.J., Moon S.K., Yang D. (2025). *Enhanced mechanical properties and reduced anisotropy of material extrusion-manufactured short carbon fibre-reinforced plastic via cold isostatic pressing.* Virtual and Physical Prototyping, 20(1), e2499934.

11. Kösemen E., Bakkal M., Kuzu A.T. (2025). *Enhancing Mechanical Performance of FDM-Printed ABS Parts Through Annealing Optimization.* Polymer Engineering & Science, 65, 4730–4739.

12. Błoński D., Romanik G., Augustyn M., Regucki P. (2026). *Tensile and Structural Performance of Annealed 3D-Printed Polymer Composite Impellers for Pump-as-Turbine Applications in District Heating Networks.* Materials, 19, 127.

13. Malagutti L., Ronconi G., Zanelli M., Mollica F., Mazzanti V. (2022). *A Post-Processing Method for Improving the Mechanical Properties of Fused-Filament-Fabricated 3D-Printed Parts.* Processes, 10, 2399.

14. Abdulridha H. H., Abbas T. F., Bedan A. S. (2024). *Investigate the Effect of Chemical Post Processing on the Surface Roughness of Fused Deposition Modeling Printed Parts*. Advances in Science and Technology. Research Journal, 18(2), 47–60.

15. Raz K., Chval Z., Hula F., Markopoulos A. (2025). *Surface Treatment and Analysis of 3D-Printed Plastic Molds for Prototype and Small-Series Injection Molding*. Polymers 17(22), 2977.

ТРИБОЛОГІЧНІ І МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ПРОБЛЕМИ В ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТІ/ TRIBOLOGICAL AND MATERIALS SCIENCE ISSUES IN ENGINEERING AND TRANSPORT

ВИБІР МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ У КОНСТРУКЦІЯХ АВТОМОБІЛІВ

Свідерський В., Гладкий Н., Бонк Н.
Хмельницький національний університет, Україна

Анотація

Ефективна робота механізмів у граничному та змішаному режимах змащування, особливо за умов ударних навантажень, переривчастих переміщень чи пресової посадки, неможлива без використання твердих і пластичних мастильних матеріалів.

Серед їхніх переваг вважають здатність ефективно працювати за кімнатних температур і хімічна інертність щодо пластиків, які застосовують у конструкціях сучасних машин та механізмів. У якості компонентів твердих мастил використовують оксиди, фосфати, фториди металів, дисульфід молібдену та сульфіди інших металів, окрім того застосовують самі метали, графіт, нітрид бору та їх суміші. Тверді змащувальні матеріали можуть працювати у більш широкому діапазоні температур, а ніж мастила у вигляді рідини. Правильно підібрані компоненти, які входять до композиційного мастильного матеріалу, забезпечують достатньо високу несучу здатність при необхідних антифрикційних властивостях та мінімальному зношуванні вузла тертя. Основні експлуатаційні вимоги до пластичних мастил (ПМ) наступні: однорідність і стабільність, забезпечення заданих механічних характеристик, незначний вплив на конструкційні матеріали, які контактують з мастилом, забезпечення необхідних мастильних протизадирних та протизносних властивостей. При обгрунтованому виборі та застосуванні пластичні мастила забезпечують досить ефективний антикорозійний захист багатьох конструкційних матеріалів. Революційним напрямом у розвитку мастильних матеріалів вважають нанотехнології, що змінюють звичайні підходи до трибології та інженерних рішень. Застосування наночастинок розміром від 1 до 100 нанометрів у складі мастил відкриває величезні можливості для суттєвого зменшення тертя, підвищення зносостійкості та відповідно збільшення терміну роботи високонавантажених вузлів автомобілів. У сфері автомобільної техніки використання нанотехнологій змінює звичні виробничі підходи та матеріали, забезпечуючи суттєве покращення експлуатаційних параметрів.

Ключові слова

Композиційні мастильні матеріали, тверді мастила, зносостійкість, коефіцієнт тертя, механічні властивості, наномастила, пластичні мастила.

SELECTION OF LUBRICANTS FOR USE IN AUTOMOTIVE CONSTRUCTIONS

Svidersky V., Gladky N., Bonk N.
Khmelnytskyi National University, Ukraine

Abstract

Effective operation of mechanisms in limit and mixed lubrication modes, especially under shock loads, intermittent movements or press fit, is impossible without the use of solid and plastic lubricants. Among their advantages are the ability to work effectively at room temperatures and chemical inertness to plastics used in the construction of modern machines and mechanisms. As components of solid lubricants, oxides, phosphates, metal fluorides, molybdenum disulfide and sulfides of other metals are used, in addition, metals themselves, graphite, boron nitride and their mixtures are used. Solid lubricants can operate in a wider temperature range than liquid lubricants. Properly selected components included in the composite lubricant provide a sufficiently high load-bearing capacity with the necessary antifriction properties and minimal wear of the friction unit. The main operational requirements for plastic lubricants (PM) are as follows: uniformity and stability, ensuring the specified mechanical characteristics, insignificant impact on structural materials in contact with the lubricant, ensuring the necessary anti-seize and anti-wear properties of the lubricant. With a reasonable choice and application, plastic lubricants provide quite effective anti-corrosion protection of many structural materials. Nanotechnology is considered a revolutionary direction in the development of lubricants, changing the usual approaches to tribology and engineering solutions. The use of nanoparticles with a size of 1 to 100 nanometers in the composition of lubricants opens up enormous opportunities for significantly reducing friction, increasing wear resistance and,

accordingly, increasing the service life of highly loaded vehicle components. In the field of automotive engineering, the use of nanotechnology changes the usual production approaches and materials, providing a significant improvement in operational parameters.

Keywords

Composite lubricants, solid lubricants, wear resistance, friction coefficient, mechanical properties, nanolubricants, plastic lubricants.

Вступ

Досягнення ефективного граничного та змішаного змащувального режиму механізмів при важливих умовах експлуатації таких, як переривчасті рухи, ударні навантаження, а також пресова посадка неможливе без використання змащувальних твердих матеріалів. Тверді змащувальні матеріали можуть працювати у більш широкому діапазоні температур, а ніж мастила у вигляді рідини.

Із переваг цих мастил можна відмітити працездатність при кімнатних температурах та інертність до пластиків, що застосовуються у конструкціях деталей сучасних транспортних засобів таких, як політетрафторетилен (ПТФЕ), поліетилен та поліамід. У якості інгредієнтів твердих мастил широке застосування отримали: дисульфід молібдену та сульфіди інших металів, оксиди, фосфати, фториди металів, а також безпосередньо метали, графіт, нітрид бору і їх суміші. Тверді змащувачі можуть застосовуватися у формі порошків, паст, добавок до пластичних мастил, масляних суспензій або пігментів у складі протизношувальних покриттів. Пластичні мастила (ПМ) мають відповідати експлуатаційним вимогам, основними з яких вважають однорідність та стабільність, збереження заданих механічних характеристик, незначний вплив на конструкційні матеріали, які перебувають у контакті з мастилом, а також забезпечення необхідних мастильних протизадирних та протизносних властивостей.

У порівнянні з моторними оливами одними з нових вимог до пластичних мастил вважається забезпечення однорідності та збереження заданих механічних характеристик. До більшості видів пластичних мастил висувають вищі вимоги до здатності матеріалу протистояти корозії. На ці параметри впливають здатність мастила протистояти дії вологи, його вологонепроникність і вміст нейтралізувальних речовин та антикорозійних інгібіторів. Правильно підібрані та належно використані ПМ гарантують високий рівень антикорозійного захисту для більшості матеріалів конструкційного призначення.

Застосування наночастинок від 1 до 100 нанометрів як компонент мастил веде до безперечних можливостей зниження тертя до мінімальних значень, підвищення зносостійкості і продовження терміну застосування високонавантажених вузлів тертя.

У сфері автомобільної техніки використання нанотехнологій змінює звичні виробничі підходи та матеріали, забезпечуючи суттєве покращення експлуатаційних параметрів. Це особливо проявляється в мастильних матеріалах, де наночастинки виконують роль активних функціональних присадок.

Об’єкт та методи дослідження

Об’єктом дослідження є тверді, пластичні та наномастила в конструкціях автомобільної техніки. Предметом дослідження є аналіз складу та властивостей композиційних мастильних матеріалів.

Методи дослідження: аналіз складу та властивостей композиційних мастильних матеріалів (КММ); технології виготовлення КММ; оцінка зносостійкості та механічних характеристик КММ з метою обґрунтування їх вибору для застосування в конструкціях автомобілів.

Постановка завдання

Сучасна промисловість потребує виробництва та застосування нових композиційних мастильних матеріалів із високим рівнем експлуатаційних характеристик.

Тому завдання обґрунтування вибору для застосування нових композиційних мастильних матеріалів в конструкціях автомобілів є досить актуальним.

Метою роботи є обгрунтування вибору мастильних матеріалів для застосування у конструкції автомобіля.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

– проаналізувати тверді мастильні матеріали з метою їх вибору для застосування в конструкції автомобіля;

– виконати аналіз властивостей та вибір пластичних мастил для вузлів тертя автомобільної техніки;

– реалізувати аналіз властивостей наномастил та їх переваги для застосування в конструкціях автомобілів.

Результати та їх обговорення

У якості інгредієнтів твердих мастил широке застосування отримали: дисульфід молібдену та сульфіди інших металів, оксиди, фосфати, фториди металів, а також безпосередньо метали, графіт, нітрид бору і їх суміші. Тверді змащувачі можуть застосовуватися у формі порошків, паст, добавок до мастил, масляних суспензій або пігментів у складі протизношувальних покриттів. Значного поширення, зокрема для напрямних втулок клапанів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), набули композиційні мастильні матеріали на металевій основі, простір пор яких заповнений політерафторетиленом (ПТФЕ) з добавками сульфідів, селенідів і телуридів молібдену, вольфраму, ніобію та інших металів. У подібних композиціях тверді мастила, окрім змащувальної функції, забезпечують підвищену несучу здатність і високу зносостійкість.

Вплив питомого навантаження (*p)* на коефіцієнт тертя (*f*) металополімерних композицій приведена на рис. 1 [1].

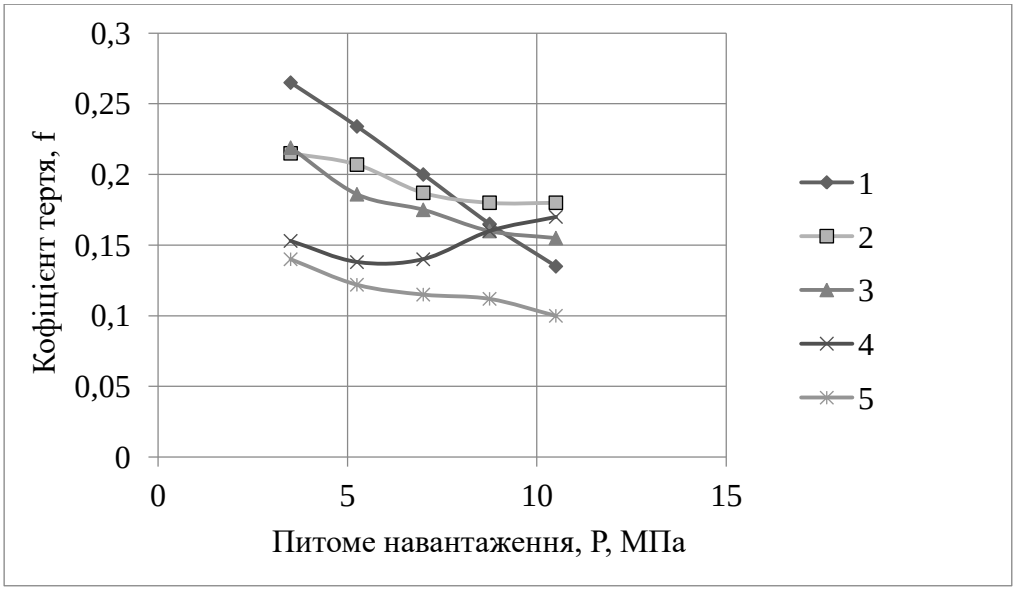


Рис. 1. Вплив питомого навантаження (p) на коефіцієнт тертя (f) металополімерних композитів, наповнених твердими мастилами: 1 – ПТФЕ+мідь+MoS_2; 2 – ПТФЕ+мідь+$MoSe_2$; 3 – ПТФЕ+мідь+$NbSe_2$; 4 – ПТФЕ+срібло+$NbSe_2$; 5 – ПТФЕ+срібло+WSe_2

Як видно з результатів досліджень, найбільш низький і стабільний коефіцієнт тертя для металополімерних композитів в залежності від навантаження у композиту – ПТФЕ+срібло+WSe_2.

Залежність зносу (*I*) від питомого навантаження (*P*) для металополімерних композиційних матеріалів, наповнених твердими мастилами наведена на рис.2 [1].

За результатами експериментальних досліджень можна зробити висновок, що найкращу зносостійкість має композиційний матеріал – ПТФЕ+мідь+$NbSe_2$. При цьому температура робочих мастил обмежується допустимою температурою експлуатації композиційного матеріалу з металевою основою. Композиційні мастильні матеріали застосовують у вузлах тертя у вигляді корінних вкладишів та поршневиих кілець, які протягом усього ресурсу ДВЗ не потребують заміни. За ефективного відведення тепла такі вузли здатні тривалий час функціонувати без додаткового змащування. Крім того, більшість КММ сумісна з рідкими та пластичними мастильними матеріалами, що дозволяє застосовувати їх у підшипниках ковзання двигунів внутрішнього згоряння. Це надає можливість значно підвищити надійність двигуна, особливо у режимі мастильного голодування.

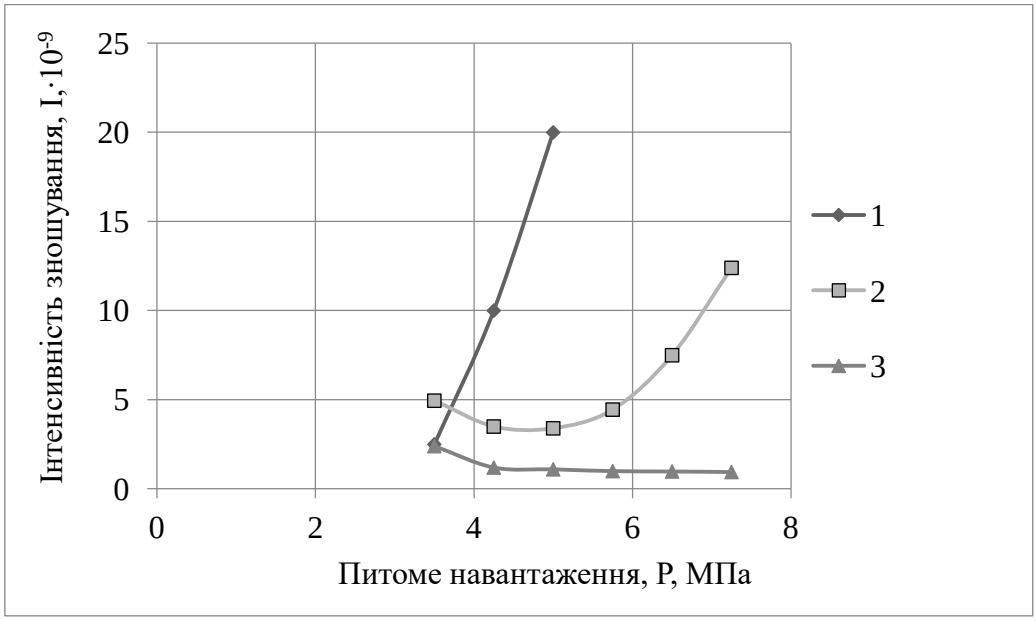


Рис. 2. Залежність інтенсивності зносу від питомого навантаження для металополімерних композиційних матеріалів, наповнених твердими мастилами: 1 – ПТФЕ+мідь+MoS_2; 2 – ПТФЕ+мідь+$MoSe_2$; 3 – ПТФЕ+мідь+$NbSe_2$

До прикладу, для вкладок корінних та шатунних підшипників рекомендовано застосовувати композиційний матеріал з мідно-молібденовою основою (CuO + MoS_2). А для підшипників розподільного валу використовують вкладиші з пористих металополімерних композицій, в основі яких м'які метали, що насичені твердим фталоціаніновим мастилом [2] . Виготовляють матеріал у вигляді сталевої стрічки, на поверхню якої методом спікання нанесено тонкий шар сферичних частинок пористої олов'янистої бронзи, що просочені сумішшю фторопласту та свинцю. При цьому сталева основа забезпечує необхідну міцність підшипника, бронзовий шар – ефективне відведення теплоти, а композиція тефлону зі свинцем – високі мастильні властивості.

Таким чином, встановлено, що перспективними є мастильні композиційні матеріали на основі пористих структур, отриманих шляхом спікання пакета спресованих металевих сіток. У таких композиціях тверде мастило, окрім змащувальної функції, забезпечує високу несучу здатність і підвищену зносостійкість. При застосуванні твердих мастильних матеріалів, поряд з їх експлуатаційними властивостями, потрібно також враховувати економічні чинники, зокрема вартість.

Пластичні мастила (ПМ) мають відповідати наступним експлуатаційним вимогам, основними з яких вважають однорідність та стабільність, збереження заданих механічних

характеристик, незначний вплив на конструкційні матеріали, які перебувають в контакті з мастилом, а також забезпечення необхідних мастильних протизадирних та протизносних властивостей.

У порівнянні з моторними оливами одними з нових вимог до пластичних мастил вважається забезпечення однорідності та збереження заданих механічних характеристик. До більшості видів пластичних мастил висувають вимоги до здатності матеріалу протистояти корозії. На ці параметри впливають здатність мастила протистояти дії вологи, його вологонепроникність і вміст нейтралізувальних речовин та антикорозійних інгібіторів. Правильно підібрані та належно використані ПМ гарантують високий рівень антикорозійного захисту для більшості матеріалів конструкційного призначення [2].

Ні один із виду пластичних мастил не має комплексу оптимальних властивостей, що можуть забезпечити роботу більшість механізмів у будь-яких умовах. ПМ вибирають на основі конкретних умов роботи заданого механізму. Під час вибору пластичного мастила слід зважати на умови його експлуатації, спосіб подачі мастильного матеріалу до вузла тертя, а також імовірність контакту мастила з різними речовинами та механічними домішками. Важливу роль відіграє і матеріал поверхонь, з якими взаємодіє мастило. З урахуванням цих факторів і вимог нормативної документації визначають відповідний тип ПМ.

При застосуванні ПМ необхідно враховувати наступні рекомендації:

– пластичні мастила мають бути такими, щоб залишався деякий запас між максимальною експлуатаційною температурою та температурою краплепадіння. Для середньо- і тугоплавких пластичних мастил цей запас становить біля 10 ºС, а для низькоплавких ПМ – 15 ºС;

– при експлуатаційних температурах понад 100 ºС та при довготривалій експлуатації ПМ мають містити антиокислювальну присадку;

– колоїдна стабільність і механічні характеристики ПМ мають відповідати навантаженням, що діють у механізмі;

– обов’язково необхідно враховувати низькотемпературні характеристики ПМ, основний вплив на які мають відповідні оливи, що входять до складу;

– у високошвидкісних підшипниках кочення використовують ПМ, які одержані на малов'язких оливах;

– при виборі загусника враховують те, що за однакових інших умов зі зростанням швидкості відносного переміщення поверхонь пластичне мастило повинно мати більшу щільність. Саме це забезпечує рівномірна подача оливи до контактних поверхонь тертя, знижується перемішування ПМ у вузлі тертя і зменшуються втрати на тертя. При застосуванні для подачі ПМ мастилопроводів необхідно використовувати не надто щільні ПМ, одержані на малов'язких оливах;

– пластичні мастила, котрі працюють в умовах забруднень зовнішнього середовища, повинні значніше герметизувати ділянку тертя і відповідно мати більшу щільність.

Революційним напрямом в мастильних матеріалах, що трансформує звичайні підходи до трибології і інженерних рішень, вважають нанотехнології [3,4]. Сьогодні ця технологія вже вийшла за межі експериментальних напрацювань і впевнено зайняла своє місце в промислових застосуваннях, забезпечуючи ефекти, недосяжні для традиційних способів змащування.

У сфері автомобільної техніки використання нанотехнологій змінює звичні виробничі підходи та матеріали, забезпечуючи суттєве покращення експлуатаційних параметрів. Це особливо проявляється в мастильних матеріалах, де наночастинки виконують роль активних функціональних присадок.

Галузі використання, переваги нанотехнологій і економічний ефект від застосування наведені в таблиці 1.

В індустріальній практиці застосування наномастил дає змогу розв'язувати низку ключових інженерних проблем:

– зменшення енергетичних втрат безпосередньо у трибосполученнях;
– підвищення ресурсу експлуатації механізмів при високих навантаженнях;
– досягнення стабільної роботи при екстремальних температурах;
– зниження екологічного навантаження із-за зменшення кількості мастильного матеріалу;
– підвищення ефективності функціонування складних технічних систем у режимах граничного тертя.

В наш час наномодифіковані мастильні матеріали достеменно продемонстрували свою перевагу над традиційними аналогами.

Таблиця 1. Галузі застосування нанотехнологій, їх переваги та економічний ефект

Галузь промисловості	Переваги нанотехнологій	Економічний ефект
Важке машинобудування	Зменшення зносу вузлів тертя на 30–50 %	Підвищення міжремонтних інтервалів у 1,5–2 рази
Автомобілебудування	Зниження тертя на 40–60 %	Економія палива до 5–7 %
Енергетика	Ріст коефіцієнта корисної дії трансмісій на 3–4 %	Зниження експлуатаційних витрат на 12–15 %
Авіація та космонавтика	Забезпечення працездатності в екстремальних умовах	Зниження маси вузлів тертя на 8–10 %

Основні переваги наномастил:

– достатнє зниження коефіцієнта тертя – до 70 % у порівнянні із базовими оливами, що приводить до енергозбереження і зниження тепловіддачі;
– збільшення несучої здатності механізмів за рахунок підвищення гранично допустимого навантаження на вузли тертя у 1,5–2,5 рази;
– зниження зношення (у певних режимах експлуатації інтенсивність зносу знижується до дуже малих значень);
– широкий температурний діапазон (збереження основних характеристик за високих до +350 °С та низьких до -70 °С температур);
– продовжений термін застосування мастильного матеріалу (підвищення у 1,8–3 рази за рахунок зменшення окисної деградації);
– властивості регенерації у результаті поступового відновлення в процесі експлуатації контактуючих поверхонь;
– суттєво покращена адгезія до поверхонь тертя, яка проявляється у формуванні стійкого граничного мастильного шару;
– достатня стабільність у екстремальних умовах, а саме: стійкість до хімічно агресивних речовин, опір вимиванню водою.

Основні переваги наномастил в порівнянні з традиційними мастилами наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Переваги наномастил в порівнянні з традиційними мастилами

Найменування параметра	Традиційні мастила	Наномодифіковані мастила	Покращення (%)
Коефіцієнт тертя	0,1–0,2	0,03–0,06	70–85
Відносна зносостійкість	1	3–5	200–400
Граничне навантаження до задиру (МПа)	1500–2000	2500–4000	60–100
Ресурс мастильного	200–300	400–900	100–200

матеріалу (мотогодини)			
Температурний діапазон застосування (ºС)	від -40 до +200	від -70 до +350	115
Аварійна експлуатація без мащення (км)	2–5	15–50	650–900

Застосування нанотехнологій у системах змащування виходить за межі модифікації власне мастильних матеріалів. Комплексний підхід передбачає також наноструктурування контактуючих поверхонь, що у поєднанні з наномастилами формує синергетичний ефект і суттєво змінює трибологічні характеристики вузлів тертя.

Основні способи наноструктурування поверхонь [3]:

– лазерне мікро- та нанотекстурування в результаті утворення впорядкованих ділянок мікропоглиблень із контрольованою геометрією резервуарів мастила;

– плазмове наноструктурування, яке полягає у формуванні градієнтних структур зі змінними механічними характеристиками;

– променево-іонна імплантація, що проявляється при введенні наночастинок у поверхневий шар з метою модифікації трибологічних характеристик;

– нанесення наноструктурованих покриттів, які представляють собою багатошарові композити із контрольованою наноархітектурою;

– хімічне наноструктурування, а саме: селективне травлення, що полягає у створенні поверхневих ієрархічних структур;

– біоміметичний поверхневий дизайн – відтворення наноструктур природних об’єктів, що характеризуються унікальними трибологічними характеристиками.

Основні способи наноструктурування поверхонь наведені у таблиці 3.

Сучасні технології дали змогу втілити концепцію синергетичних трибопар, у межах якої наноструктуровані поверхні та наномодифіковані мастильні матеріали проєктуються як єдина система із взаємодоповнювальними характеристиками [3].

В таких системах спостерігається безпрецедентний рівень трибологічних властивостей, а саме:

– коефіцієнт тертя зменшується до значень 0,01– 0,03;

– зносостійкість зростає у 5–10 разів;

– проходить формування “самоадаптованого” трибошару, який в залежності від умов експлуатації оптимізує свої властивості;

– відбувається самозаліковування мікродефектів поверхні у процесі експлуатації.

Таблиця 3. Основні методи наноструктурування поверхонь

Тип наноструктурування	Характерні розміри (нм)	Трибологічний ефект	Оптимальні наномастила
Лазерні мікропоглиблення	200–500	Ємності мастила, зниження коефіцієнта тертя на 40-60 %	Мастила з наночасточками MoS_2
Нанорозмірна шорсткість	10–50	Підвищення кількості мастила у 2–3 рази	Графенові наномастила
Алмазоподібні покриття	Товщина шару 5–15	Зниження зносу у 5 разів	Мастила з наноалмазами
Іонно-імплантовані шари	Глибина 20–80	Підвищення твердості	Металоплакуючі наноприсадки

Автомобільна галузь стала одною із перших масового впровадження наномастил, що зумовлено жорсткими екологічними нормами та підвищеними вимогами до паливної економічності. Основні напрямки використання:

– моторні мастила з графеновими і наноалмазними присадками, що дають можливість збільшити інтервали між замінами до 30000 км;

– трансмісійні оливи з нанокерамічними добавками, що підвищують коефіцієнт корисної дії трансмісій на 4–6 %;

– пластичні мастила з наночастинками дисульфіду молібдену для ходової частини;

– гідравлічні змащувальні рідини з наночастинками SiO_2 для активної підвіски та систем кермового управління.

Висновки

1. Встановлено, що перспективні композиційні мастильні матеріали на основі пористих матеріалів, виготовлені спіканням пакету спресованих металевих сіток. Композиційні мастильні матеріали на металевій основі, пори яких заповнені фторопластом-4 з добавками сульфідів, селенідів та телуридів молібдену, вольфраму, ніобію та інших металів набули поширення для вузлів тертя автомобільної техніки. У таких композиціях тверде мастило крім мастильної дії забезпечує високу несучу здатність та зносостійкість. Високу ефективність у вузлах тертя мають тверді мастила WS2 та WSe2, але їх застосування обмежується великою вартістю.

2. Пластичні мастила вибирають на підставі конкретних умов роботи заданого вузла тертя. При підборі ПМ необхідно задати умови його роботи: температурний діапазон експлуатації; відносну швидкість руху контактуючих поверхонь; питомого тиску у вузлі тертя; час безперервної роботи ПМ та метод підведення мастила до вузла тертя, а також можливість контакту ПМ з водою, киснем, хімічно активними речовинами, механічними забрудненнями. Велике значення має матеріал, що контактує з пластичним мастилом. За цими даними та за нормативами на товарні мастильні матеріали підбирають відповідний вид ПМ.

3. Ефективність наночастинок у мастильних матеріалах обумовлена комплексом фізико-хімічних механізмів, що діють на молекулярному та субмолекулярному рівні. Розуміння цих процесів є, безумовно, ключем до вибору та оптимального застосування нанотехнологій у триботехнічних системах автомобілів. Комплексний підхід включає також наноструктурування контактуючих поверхонь, що створює синергетичний ефект з наномастилами і радикально трансформує трибологічні характеристики вузлів тертя.

Література

1. Експлуатаційні матеріали на автомобільному транспорті : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільний транспорт» галузі знань 27 Транспорт спец. 274 Автомобільний транспорт денної та заоч. форм навч. / уклад. Т.В. Фурс. – Луцьк : Луцький НТУ, 2021. – 148 с.

2. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення : навч. посіб. / В. Я. Чабанний, М. І. Черновол, Є. К. Солових [та ін.] ; ред. В. Я. Чабанний. - Кропивницький : ЦНТУ, 2022. – 486 с.

3. Автомобільні експлуатаційні матеріали: навч. посіб. для студ. ВНЗ. Ч. 1 : Паливно-мастильні матеріали та спеціальні рідини / М. К. Сукач [та ін.] ; Відкритий міжнар. ун-т розвитку людини "України" Автор(и): Сукач Михайло Кузьмич ; Сидоренко Василь Павлович ; Аржаєв Геннадій Олександрович ; Литвиненко Іван Миколайович Відкритий міжнар. ун-т розвитку людини "України". Вихідні дані: Київ : Університет "Україна", 2006. – 255 с.

4. Технічна експлуатація та надійність автомобілів: Навчальний посібник / Форнальчик Є.Ю., Оліскевич М.С., Мастикаш О.Л., Пельо Р.А.; За загальною ред.Є.Ю. Форнальчика. Вторинна відповідальність: Форнальчик Є. Ю. ; Оліскевич М. С. ; Мастикаш О. Л. ; Пельо Р. А. ; За загальною ред.Є.Ю.Форнальчика. – Львів : Афіша, 2004. – 492 с.

УСУНЕННЯ ДЕФЕКТІВ ЦЕМЕНТАЦІЇ ТЕРМОЦИКЛІЧНОЮ ОБРОБКОЮ

Дробот О.[1], Підгайчук С.[1], Кухта К.[1]
[1] Хмельницький національний університет, Україна

Анотація

Робота присвячена дослідженню впливу термоциклічної обробки (ТЦО) на зміну фазового стану та морфології поверхневого шару і серцевини поршневих пальців зі сталі 12ХН3А після цементації. Встановлено, що традиційна технологія призводить до росту зерна та утворення небажаної цементитної сітки. Запропоновано режим ТЦО, що включає три цикли нагрівання до 870°С та охолодження до 650°С. В результаті обробки забезпечено подрібнення зерна аустеніту до 8 балу (0,016 мкм) та усунення структурних дефектів. Це дозволило отримати структуру дрібноголчастого мартенситу, що суттєво підвищує втомну міцність та експлуатаційні характеристики високонавантажених деталей ДВЗ.

Ключові слова

цементація, термоциклічна обробка (ТЦО), поршневий палець, мікроструктура, фазовий стан, подрібнення зерна, експлуатаційні характеристики.

ELIMINATION OF CARBURIZING DEFECTS VIA THERMAL CYCLING TREATMENT

Drobot O.[1], Pidhaichuk S.[1], Cuhta C.[1]
[1] Khmelnytskyi National University, Ukraine

Abstract

This study investigates the effect of thermal cycling treatment (TCT) on the transformation of the phase state and morphology of the surface layer and core of carburized 12XH3A steel piston pins. It was found that conventional processing leads to grain growth and the formation of an undesirable cementite network. A TCT regime consisting of three cycles of heating to 870°C and cooling to 650°C is proposed. The treatment resulted in austenite grain refinement to grade 8 (0.016$ μm) and the elimination of structural defects. This facilitated the formation of a fine-acicular martensite structure, significantly enhancing the fatigue strength and operational characteristics of high-load internal combustion engine components.

Keywords

Carburizing, thermal cycling treatment (TCT), piston pin, microstructure, phase state, grain refinement, operational characteristics.

Вступ

Високі експлуатаційні характеристики, які повинні мати деталі автомобільної та технологічної техніки, завжди були в центрі уваги виробничників. Забезпечення потрібних характеристик деталям машин досягають розробкою оптимальної конструкції, вибором матеріалу та проведенням сучасних технологічних процесів зміцнення. Традиційні способи зміцнення – термічна та хіміко- термічна обробка зазнали деяких змін. Змінюються температурні інтервали нагрівання виробів, джерела енергії, охолоджувальні середовища тощо. Останнім часом знайшов досить широке застосування метод термоциклічної обробки.

Термоциклічна обробка (ТЦО) у машинобудуванні — це метод зміцнення металів шляхом багаторазового повторення циклів швидкого нагрівання та охолодження в певному інтервалі температур. Цей процес формує дрібнозернисту структуру, суттєво підвищує міцність, пластичність та зносостійкість легованих сталей і сплавів.

В практиці термічної та хіміко - термічної обробки давно впроваджені технологічні способи, в яких використовують циклічну багаторазову зміну температури [1]. Прикладом цього є багаторазова нормалізація, гартування чи відпуск, циклічний чи маятниковий відпал, а також поверхневе зміцнення деталей методом іонно-плазмового термоциклічного азотування та інші. Загальний вигляд режиму термоциклічної обробки показано на (рис.1).

Технологічні процеси ТЦО складаються з операцій багаторазового нагрівання та охолодження, режими яких мають дві характерних відміни від традиційного методу термічної обробки:

1) - відсутність витримки при постійній температурі нагрівання;

2) - виконання багаторазових нагрівань та охолоджень з оптимальними швидкостями.

При ТЦО виключається такий технологічний параметр як витримка при максимальній температурі нагрівання, а враховується інший - оптимальна кількість термоциклів обробки (число термоциклів за одиницю часу).

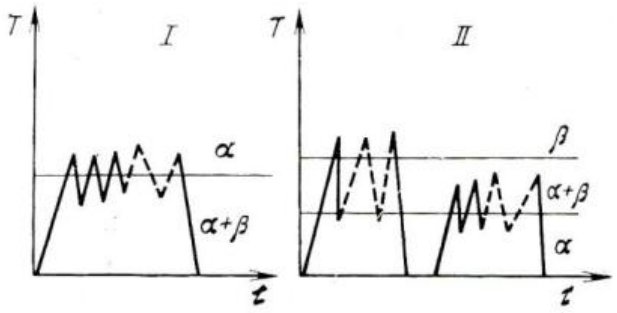


Рис. 1. Схема термоциклічної обробки

Особливістю ТЦО є те, що в сплавах під час обробки відбуваються багаторазово структурні і фазові перетворення. В одних випадках внаслідок прискорених нагрівань та охолоджень відбуваються тільки структурні зміни, в інших - структурні і фазові зміни внаслідок створення умов для неповних фазових переходів з різним ступенем завершеності чи повних багаторазових фазових перетворень з оптимальними швидкостями.

Термоциклічна обробка - це процес термічного впливу, який здійснюється шляхом неперервної циклічної зміни температури і супроводжується багаторазовими структурними чи фазовими перетвореннями. Метою ТЦО є отримання потрібних змін структури, фазового складу чи напруженого стану матеріалу, які і будуть визначати його властивості За результатами численних досліджень зміна структури і фізико-механічних властивостей металів і сплавів відбувається при проведені ТЦО, яка супроводжується фазовими перетвореннями. Характер цих змін визначається типом фазових перетворень, ступенем їх завершеності і температурно-швидкісними умовами їх протікання під час ТЦО. Для сталей нагрівання проводять переважно вище точок фазових перетворень (Ac_1, Ac_3) з наступним охолодженням, що викликає структурну перебудову матеріалу.

В результаті багаторазової аустенізації, через різницю питомих об'ємів перетворених фаз, в металі протікають процеси, властиві нагріванню слабодеформованих металів, а саме: дифузія точкових дефектів і їх накопичення на границях зерен, блоків. Частково дислокації анігілюють, відбувається їх перерозподіл з утворенням мало кутових меж. Ці процеси сприяють формуванню дрібнозернистої структури після ТЦО.

ТЦО використовують для покращення властивостей поверхні так і об'єму, формування заданого фазового складу для покращення експлуатаційних характеристик у порівнянні зі звичайним гартуванням.

Об'єкт та методи дослідження

Об’єктом дослідження є процес формування фазового складу та мікроструктури поверхневого шару і серцевини деталей типу «поршневий палець», виготовлених із хромонікелевої сталі 12ХН3А, після комбінованої обробки (цементація + ТЦО).

Матеріали та підготовка зразків

Для проведення досліджень використовували серійні поршневі пальці, виготовлені методом холодного пластичного деформування (ХПД). Хімічний склад сталі 12ХН3А відповідає стандартам для високонавантажених деталей ДВЗ. Попередньо зразки піддавали цементації для насичення поверхневого шару вуглецем до концентрації 0,7 … 0,9%.

Методика термоциклічної обробки (ТЦО)

Термоциклічну обробку проводили за розробленою схемою, що передбачала три повних цикли «нагрівання — охолодження». Параметри одного циклу включали:

- нагрівання: швидке нагрівання до температури повної аустенізації (870°С);
- охолодження: швидке охолодження до температури 650°С;
- витримку: ізотермічна витримка при 650°С протягом 60с для стабілізації структурних перетворень.

Завершальною стадією **було** гартування з аустенітного стану після третього циклу з наступним низьким відпуском.

Для комплексної оцінки впливу ТЦО на матеріал було застосовано нижче вказані методи.

Металографічний аналіз, що передбачав вивчення мікроструктури, морфології фаз (мартенситу, залишкового аустеніту) та виявлення цементитної сітки. Аналіз проводили за допомогою оптичного мікроскопа ММР. Оцінка розміру зерна полягала в визначені балу зерна аустеніту за методикою, наведеною в ДСТУ 8972:2019 «Сталь і сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна» [3].Визначення твердості поверхневого шару та серцевини оцінювали за шкалою Роквелла (HRC) згідно з регламентованими вимогами до деталей циліндро-поршневої групи (58…62HRC для поверхні та 29…38HRC для серцевини).

Постановка завдання

Властивості деталі починають формуватись в процесі лиття, обробки тиском, зварювання, механічної обробки. При виконанні цих операцій закладаються показники довговічності майбутніх деталей машин. Усі наступні операції проводять для покращення властивостей матеріалу заготовки. Подальше підвищення довговічності деталей машин при їх виготовленні відбувається шляхом застосування різни методів термічної та хімік-термічної обробки.

Двигун внутрішнього згорання є головним вузлом автомобіля.

Одним з найбільш навантажених вузлів при роботі ДВЗ є циліндро-поршнева група, у яку входить поршневий палець, який лімітує ресурс і довговічність двигуна, а в цілому визначає його працездатність.

Поршневі пальці переважно виготовляють з цементованих сталей 15ХФ, 20Х, 12ХН3А, 18ХГТ та поліпшувальних 40, 40Х.

Поршневий палець під час роботи піддається впливу циклічних навантажень, тому 90% пошкоджень виникають з причини розвитку втомних тріщин, одночасно палець піддається зносу при взаємодії з поверхнями бобишок поршня та втулкою голівки шатуна. Найбільш ефективним засобом підвищення зносостійкості пальця поршневого є підвищення його міцності, твердості та зносостійкості проведенням хіміко-термічної обробки - цементації та гартування [2].

Результати та їх обговорення

Хромонікелеві сталі - 12ХН3А мало чутливі до перегріву при тривалій цементації і не схильні до пересичення поверхневих шарів, тому їх переважно використовують для виготовлення пальців поршневих.

Збільшення кількості вуглецю в поверхневому шарі після цементації та наступна термічна обробка (гартування і відпуск) дозволяють отримати на поверхні твердість в межах HRC 58 -62, а в серцевині HRC 29 -38. Така твердість забезпечує високу зносостійкість та втомну міцність цих деталей [2].

Для досягнення максимального зміцнення деталей, які працюють в умовах статичних і динамічних навантажень, кількість вуглецю в цементованому шарі повинна бути в межах 0,7 -0,9% . Структура загартованого шару повинна складатись з дрібноголчатого мартенситу з невеликими ділянками залишкового аустеніту (не більше 15 -20%) і рівномірно розподіленими дрібними карбідами.

Така структура формується при вмісті вуглецю в поверхневому шарі 0,7 -0,9 %. Троститні включення у вигляді сітки чи стрічки біля зовнішньої поверхні допускаються лише у випадках якщо глибина їх розташування не перевищує припуску на шліфування. Недопустимі виділення у великій кількості ізольованих грубих карбідів, які знижують в'язкість сталі, а також виділення фериту у вигляді включень по границях зерен.

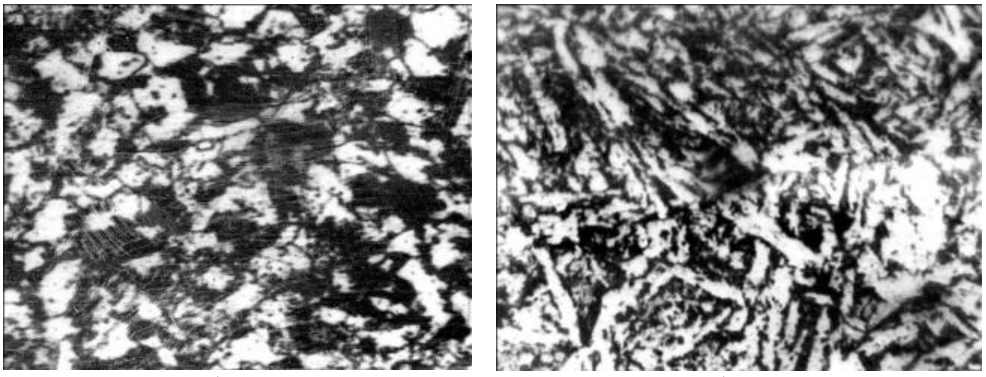
Залишковий аустеніт в структурі знижує твердість і міцність загартованої сталі, а цементитна чи феритна сітка, яка зберігається при неповному гартуванні, викликає різке зниження ударної в'язкості

Будь - які відхилення в структурі сталі викликають погіршення механічних властивостей загартованої і відпущеної сталі.

Враховуючи вищесказане досліджена структура поршневих пальців із сталі 12ХН3А після різних етапів обробки.

Поршневі пальці виготовляють методом ХПД - холодного пластичного деформування, і після механічної обробки піддають цементації, гартуванню та низькому відпуску. Однак, за результатами випробувань на втому, поршневі пальці мають недостатню утомну міцність. Аналіз причин дозволив знайти недоліки.

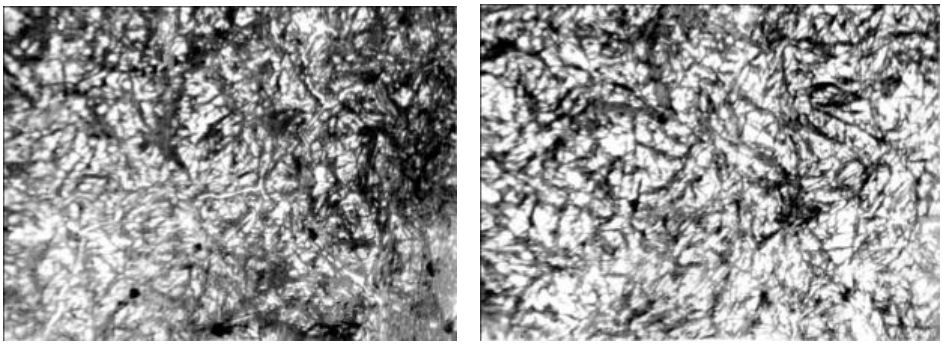
Дослідження структури сталі вихідної та після цементації показав значний ріст зерна під час цементації (рис.2) [3].



а) *б)*

Рис.2 Структура сталі 12ХН3А : а) – до обробки; б) серцевина після цементації, х 200.

Виявлено надмірне насичення поверхні цементованого шару вуглецем, що стало причиною наявності залишків цементитної сітки та кристалів грубоголчастого мартенситу після гартування (рис.3, а), та підвищеного вмісту залишкового аустеніту (рис.3, б).



а) *б)*

Рис. 3 Структура сталі 12ХН3А після цементації та гартування: а – грубоголчастий мартенсит із залишками цементитної сітки; б – грубо голчастий мартенсит і залишковий аустеніт.

Недостатня утомна міцність поршневих пальців спричинена дефектами структури, а саме: грубо голчастою будовою мартенситу та залишковим аустенітом. Відомо, що суттєвим недоліком цементації є ріст зерна серцевини деталей. Тому деталі, які піддають цементації, рекомендовано виготовляти із спадково-дрібнозернистих сталей з балом зерна аустеніту 6-8, який зберігається під час тривалої витримки. Для подрібнення зерна серцевини проводять термічну обробку за режимами, описаними в [1, 4]. З цією метою можна проводити попередню термообробку (нормалізацію) з прискореним охолодженням до температури 700^{o}C.

Виходячи з цього встановлено, що резервами для підвищення утомної міцності поршневих пальців є удосконалення режимів хіміко-термічної і термічної обробки.

Запропоновано проведення термоциклічної обробки (ТЦО), яка дозволить зменшити розмір аустенітного зерна, можливу різнозернистість, подрібнити цементитну сітку, досягти більш рівномірного розподілення елементів структури для підвищення ударної в'язкості та характеристик утоми. ТЦО [4] дозволяє виконати такі важливі завдання, як підвищення надійності машин та зносостійкості деталей машин та вузлів тертя.

Зразки сталі 12ХН3А після цементації піддавали ТЦО за такою схемою: один цикл обробки здійснювався так - швидке нагрівання до температури повної аустенізації (870^{o}C), швидке охолодження до 650^{o}C, витримка при цій температурі 60 с . По закінченню витримки цикл повторювався. Проведено три цикли. Останній термоцикл завершено гартуванням з аустенітного стану (рис.4).

Розмір зерна після проведення одного циклу майже не змінися. Після двох циклів бал зерна збільшився з 4 у вихідної структури до 5 , а після третього циклу вдалося зменшити зерно в поверхневому шарі до 0, 016 мкм, що відповідає балу 8 (рис.5).

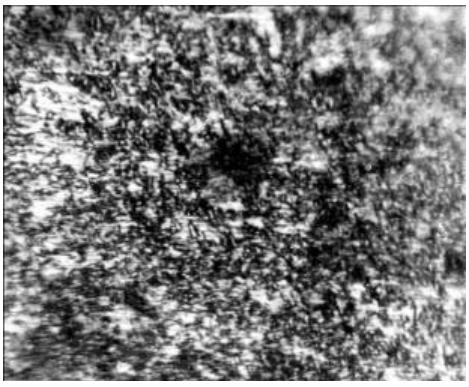


Рис. 4 Структура сталі 12ХН3А після цементації і термоциклічної обробки. бал зерна 8 .

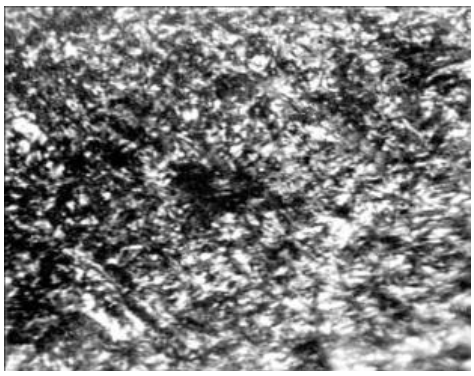


Рис. 5. Структура сталі 12ХН3А після цементації, термоциклічної обробки і низького відпуску.

Висновки

Запропонована технологічна схема отримання і обробки поршневих пальців для важко навантажених двигунів внутрішнього згорання, яка включає підготовчу термічну обробку заготовок, отримання деталей методом холодного пластичного деформування (ХПД) + цементація + ТЦО з гартування + низький відпуск, сприяє покращенню структури сталі та підвищенню її механічних властивостей.

Циклічні зміни температури сприяють значному покращенню структури дифузійного шару і серцевини цементованих деталей, а також підвищенню механічних властивостей сталі. Термоциклічна обробка дозволяє значно підвищити в'язкість сталі.

Механізм дії ТЦО на властивості сталі базується на накопиченні змін в структурі, які відбуваються за один цикл нагрівання → охолодження, що дозволило подрібнити цементитну сітку, подрібнити аустеніт, з якого отримано дрібногольчатий мартенсит, що сприяє підвищенню утомної міцності сталі.

Література

1. Диха О.В. , Свідерський В.П., Дробот О.С., Машовець Н.С. (2021) *Технологічне забезпечення довговічності технічних трибосистем:* монографія / О.В. Диха, В.П. Свідерський , О.С. Дробот , Н.С. Машовець. – Хмельницький: ХНУ, 2021. – 178 с.

2. Афтанділянц Є Г. (2013) *Матеріалознавство:* підручник / Є.Г. Афтанділянц, О.В.Зазимко, К. Г Лопатьмо. - Херсон: ОЛДІ - плюс; К.: Ліра -К, 2013.- 612с.

3. ДСТУ 8972 –2019 . *Сталь і сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна.*

4. Walvekar A. (2017) *Rolling contact fatigue of case carburized steels* / A. Walvekar, F. Sadeghi // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 95, February. – P. 264–281

VIBRATION DIAGNOSTICS OF AUTOMOTIVE BALL JOINTS BASED ON SIGNAL PROCESSING METHODS

OLEKSANDR LYTVYNOV
Khmelnytsky National University

Abstract

The technical state of vehicle suspension components plays a key role in ensuring driving safety, ride comfort, and the durability of chassis assemblies. Among these components, ball joints are particularly important because they enable the spatial movement of the steering knuckle while operating under considerable and continuously changing loads. Typical ball joint failures involve surface wear, the formation of internal clearance, lubricant deterioration, and corrosion-related damage. Conventional diagnostic approaches, such as visual examination, manual looseness inspection, or test-bench evaluation, are often subjective, time-consuming, or dependent on costly specialized equipment. For this reason, there is a clear need for vibration-based diagnostic techniques capable of evaluating ball joint condition through the analysis of vibration signals generated under

service loads.

This study focuses on vibration signal processing methods intended for the diagnosis of ball joint condition in automotive applications. A combined methodology is considered, integrating statistical time-domain features, namely kurtosis and crest factor, with spectral analysis and time-frequency analysis based on the continuous wavelet transform. Time-domain statistical indicators make it possible to automatically detect impulsive phenomena and to formulate simple binary diagnostic decisions, such as distinguishing between healthy and defective states. At the same time, wavelet-based analysis provides a more detailed representation of signal energy in both time and frequency, which helps separate impact events caused by the ball joint from background vibrations originating in the suspension system and vehicle body.

The aim of the work is to provide a theoretical justification for the selection of vibration signal processing methods that can improve the reliability of ball joint diagnostics, as well as to demonstrate their effectiveness using modeled signals that reproduce realistic operating conditions. The obtained results indicate that the combined use of kurtosis, crest factor, and wavelet transform allows highly sensitive detection of looseness and impact-related operating modes in ball joints, even in the presence of considerable external noise and random road-induced disturbances. The proposed two-stage diagnostic algorithm supports automated real-time fault identification and creates a basis for the development of portable diagnostic devices.

Keywords

vibration diagnostics, ball joint, kurtosis, crest factor, wavelet transform, signal processing.

Problem statement in general terms and its connection with important scientific or practical tasks

Traditional approaches to ball joint inspection, including visual examination, manual assessment of looseness in suspension elements, and the application of play-detection devices, have several important limitations. Their effectiveness largely depends on the experience and qualification of the operator, they provide limited capability for objective identification of early wear, they often require the vehicle to be removed from normal operation, and they may rely on dedicated diagnostic equipment.

In this context, vibration-based diagnostics can be considered a promising alternative, since it enables evaluation of the assembly condition through analysis of the system's dynamic response to operational loads or intentionally introduced test excitations.

Under normal operating conditions, a ball joint functions as a kinematic connection with a ball stud that allows smooth motion without impact events. However, once internal clearance appears, impact-type interactions begin to occur, producing short transient acceleration pulses.

These pulses are superimposed on the background vibration generated by road surface irregularities and by the functioning of other suspension components. Consequently, the diagnostic problem can be formulated as the identification and analysis of non-stationary impulsive components within a vibration signal masked by broadband noise.

Results and their discussion

For the theoretical analysis, the vibration signal is represented as the sum of a stochastic component and impulsive events:

$$x(t) = x_{noise}(t) + \sum_{k} a_k \delta(t - t_k),$$

where $x_{noise}(t)$ — stochastic road noise,
a_k — the amplitude of the k-th impact,
t_k — the time instant of the impact occurrence.

- Root Mean Square (RMS) reflects the overall energy content of a vibration signal and is associated with the effective power of the vibratory process. Among the considered indicators, it is one of the most robust with respect to isolated spikes or outliers. In ball joint diagnostics, RMS can be applied as a quick indicator of general condition, although it is not

sufficient to serve as the only diagnostic measure and is usually treated as a supporting parameter for scaling or interpreting other features.

- Kurtosis describes how sharply peaked the amplitude distribution is. In the case of Gaussian noise, its value remains near the normal baseline, whereas impact events can raise it substantially, often to the range of 8–10; for this reason, it is widely regarded as a highly effective indicator for automatic detection of looseness. The recommended threshold suggests the probable presence of clearance or looseness in the joint.
- Crest Factor expresses the ratio between the highest impact amplitude and the average vibration level represented by RMS. Unlike kurtosis, it is a linear metric, which makes it less sensitive to some artifacts and easier to interpret in practical diagnostics. The recommended threshold is typically used not as a standalone decision rule, but as an additional confirmation of the results obtained from kurtosis.
- Spectral Analysis (FFT) transforms the measured signal into a set of sinusoidal components, making it possible to examine its frequency composition and identify resonant behavior within the suspension system. In this application, FFT should be viewed as a supplementary analytical tool rather than a self-sufficient method for looseness detection.
- Time-Frequency Analysis (CWT) provides simultaneous information about when an event occurs and in which frequency band it is concentrated. Its output is a three-dimensional representation defined by time, frequency, and energy, and it is commonly presented as a heat map or scalogram for diagnostic interpretation.

Table 1 Advantages and disadvantages of each method

Method	Advantages	Disadvantages
RMS	Simple to calculate and interpret; resistant to isolated outliers compared with peak-based metrics; correlates well with the overall vibration level.	Has low sensitivity to impulsive defects such as looseness; does not indicate the nature of the defect, only its intensity; loses time-localized information.
Kurtosis	Extremely sensitive to impacts due to the fourth-power weighting; easy to compute in real time using a sliding window; effective for automatic detection of impulsive faults.	Sensitive to external interference and sensor electrical noise; depends on the selected time-window length; has a nonlinear relationship with the number and amplitude of impacts.
Crest Factor	Easy to interpret physically; more stable and less sensitive to artifacts than kurtosis; directly reflects the severity of impacts relative to the average vibration level.	Less sensitive to frequent weak impacts than kurtosis; requires prior RMS calculation.
FFT	Identifies resonances excited by impacts; helps separate background components such as engine-related vibration; useful for frequency-domain analysis of the signal.	Impacts often appear only as a nonspecific rise of the noise floor without clear peaks; loses information about the exact time of the event.
CWT	Provides time-frequency localization, showing when and at which frequency an impact occurs; highlights non-stationary events embedded in background noise; offers higher diagnostic specificity for different impact types.	Computationally expensive; difficult to interpret without training; strongly depends on the selected wavelet and parameter settings.

A two-stage diagnostic algorithm was proposed based on the analysis of all considered methods.

At Level 1 (real-time stage), kurtosis and crest factor are calculated within a sliding window. When the predefined thresholds are exceeded, the system generates a fault indication.

At Level 2 (post-processing stage), once Level 1 is triggered, a segment of the raw vibration signal is recorded and then analyzed using CWT. This step is intended to provide visual confirmation of the diagnosis and to reduce the probability of false alarms.

Such a strategy combines the speed and computational simplicity of the first stage with the higher reliability and diagnostic specificity of the second stage, making it well suited for the development of portable diagnostic systems for automotive ball joints.

Modeling of vibration signals for healthy and defective ball joints.

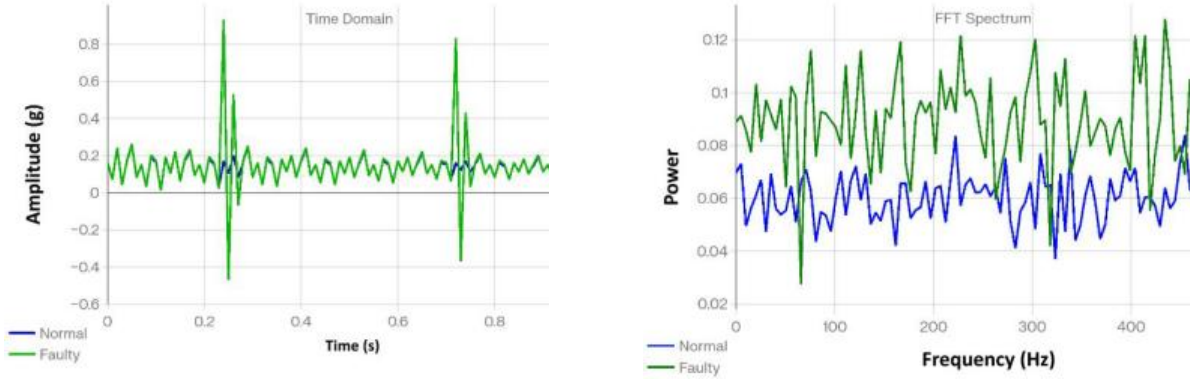
To verify the methodology, a digital simulation of two scenarios was conducted. The signals were synthesized with a sampling frequency of 1000 Hz, and the recording duration was 1 second (1000 samples).

Healthy ball joint: The signal consists of Gaussian white noise with an amplitude of approximately 0.05–0.1 g, simulating vibrations from road irregularities and body oscillations on a suspension without clearance.

Faulty ball joint: The same background noise, supplemented by impact impulses with an amplitude of approximately 0.7–0.9 g at time instances t = 0.25 s and t = 0.73 s. These impulses simulate the taking up of clearance (play) when the vehicle hits an obstacle.

In Figure 1(a), the difference between the "healthy" (blue) and "faulty" (green) waveforms is clearly visible. The green line for the faulty case exhibits distinct high-amplitude spikes, whereas the blue line remains relatively smooth. This exemplifies how clearance (play) manifests in the time-domain signal.

Spectral analysis (FFT). Figure 1(b) presents the amplitude spectra of both signals obtained using the Fast Fourier Transform (FFT). For the healthy ball joint, the spectrum shows approximately uniform amplitude across all frequencies (white noise). For the faulty joint, white noise is also observed, albeit with a slight increase in the overall level. There are no pronounced peaks that would clearly indicate a specific defect frequency. This confirms that FFT is sub-optimal for diagnosing clearance, as the impacts distribute energy across the entire spectrum rather than generating isolated harmonics. FFT is used here primarily as an auxiliary analysis tool to rule out other causes of vibration.

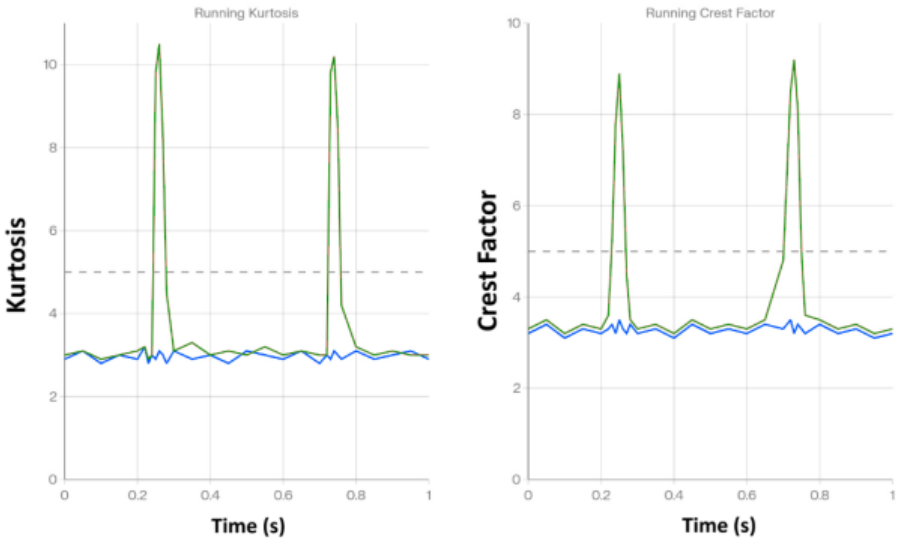


a) *b)*

Fig. 1. Computer simulation of the vibration process: (a) vibration signals of a healthy and a faulty ball joint; (b) spectral analysis of a healthy and a faulty ball joint.

Calculation of statistical criteria. The next two graphs present the results of calculating kurtosis and crest factor using a sliding window. The blue line (healthy joint) fluctuates around a value of K ≈ 3.0 throughout the entire recording duration (Fig. 2(a)). This corresponds to the theoretical value for Gaussian noise. The green line (faulty joint) remains close to 3.0 for most of

the time but sharply spikes to K ≈ 9.8–10.5 at the moments of impact (near t = 0.25 s and t = 0.73 s). This sudden increase unequivocally indicates the presence of impulsive events.



a) *b)*

Fig. 2. Simulation of statistical criteria: (a) variation of the kurtosis value over time; (b) variation of the crest factor over time.

The graph in Fig. 2(b) shows a dashed line at the K = 5.0 level. When this threshold is exceeded, the system should signal a probable clearance defect. In the faulty scenario, this occurs exactly at the moments of impact, whereas the healthy joint never crosses this threshold. Similar to kurtosis, the crest factor for the healthy joint remains stable in the range of CF ≈ 3.2–3.5. For the faulty joint, sharp peaks reaching CF ≈ 8.5–9.2 are observed at the moments of impact. A threshold of 5.0 is also indicated by a dashed line. Both indicators (kurtosis and crest factor) simultaneously exceed the threshold, providing high confidence in the presence of a defect.

Wavelet analysis (CWT). Figure 3 presents the spectrogram of the faulty signal obtained using the continuous wavelet transform (CWT) with the Morlet wavelet.

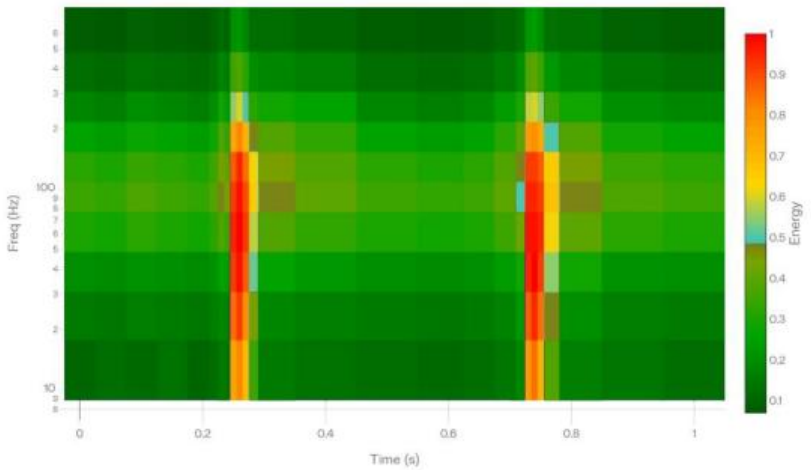


Fig. 3. Continuous wavelet transform (CWT) spectrogram

Against a predominantly dark-green background (signal background), two bright vertical bands with yellow-to-red coloration can be observed at time positions near 0.25 s and 0.73 s. These bands cover a frequency range of approximately 50 Hz to 200 Hz within the selected scale

range. Each band corresponds to a single impact impulse caused by excessive play in the ball joint.

In contrast to the FFT spectrum (Fig. 2), where the impacts appear as a nonspecific increase in the noise background, the wavelet spectrogram clearly localizes the event. This demonstrates the advantages of the time-frequency approach for the analysis of non-stationary processes.

The simulation and analysis results indicate that ball-joint diagnostics based on vibration signals requires a combination of several signal-processing methods. One-dimensional criteria based on FFT proved insufficiently sensitive to impulsive manifestations of looseness, since such manifestations do not form stable harmonics but only modify the overall noise background. In contrast, the use of kurtosis and crest factor makes it possible to effectively detect even isolated impact events.

Due to the fourth power of amplitude in the numerator, kurtosis increases sharply when outliers appear and is more sensitive to frequent but relatively small impacts. Crest factor better characterizes isolated maximum overloads and can be used as an additional criterion for refining the severity of the operating condition. The wavelet transform complements the statistical analysis by providing time-frequency localization of events.

This is particularly important under real operating conditions, where the signal is influenced by numerous external factors. Visual analysis of wavelet spectrograms allows an expert to distinguish impacts caused by structural defects in the ball joint from random external disturbances.

Conclusions

The proposed integrated approach, combining time-domain indicators such as kurtosis and crest factor with wavelet-based analysis, can therefore be regarded as both theoretically grounded and highly promising for the design of vibration-based diagnostic systems intended for automotive ball joints.

Further studies should be directed toward experimental verification of the proposed methodology under actual vehicle operating conditions, the determination of statistically reliable threshold values for the selected diagnostic indicators, and the evaluation of how sensitive these criteria are to different defect categories and loading scenarios.

Literature

1. Mykhalkiv, S., Zhalkin, D., Zhalkin, S., & Ravliuk, V. Identification of informative components using the fast kurtogram method for vibration diagnostics of rolling bearings. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies. Series "Transport Systems and Technologies"*, issue 39, 2022. http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/15129/1/Mykhalkiv.pdf

2. Vibration diagnostics of bearing assemblies of paper-making machines. *Theoretical and Experimental Mechanics*, 2022. https://ten.ztu.edu.ua/article/view/282191/276371

3. Time vs. Frequency Domain. *Vibration Research University*, 2025. https://vru.vibrationresearch.com/lesson/time-vs-frequency-domain/

4. Perederko, O. M. Processing and analysis of vibration signals for diagnosing the technical condition of machine units. Dissertation for the academic degree, Sumy State University, 2024. https://suitt.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/dysertatsiia_perederko.pdf

5. Time-frequency analysis of vibration signals using Fourier transform and wavelet methods. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Cybernetics. https://nasplib.isofts.kiev.ua/bitstreams/7accb3f5-8447-4ab0-b4ac-05d5ee569f4e/download

6. Baranov, A. V. Wavelet transform for automatic detection and analysis of anomalies in engineering systems. Electronic Publishing System, Kharkiv National Automobile and Highway University, 2019. http://eprints.kname.edu.ua/70312/1/Баранов.pdf

7. Wavelet. *Wikipedia, the free encyclopedia*. Last updated: January 14, 2005. https://uk.wikipedia.org/wiki/Вейвлет

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ВЕНТИЛЬОВАНИХ ДИСКОВИХ ГАЛЬМ ЛЕГКИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Панчишин Я., Горюха О., Диха О.
Хмельницький національний університет, Україна

Анотація

Робота присвячена тепловій поведінці та напружено-деформованому стану вентильованих дискових гальм, встановлених на легких транспортних засобах (скутерах, електровелосипедах, квадроциклах тощо) з використанням середовища ANSYS у різних режимах експерименту. Моделювання розподілу температури в роторі (диску) та відповідних гальмівних колодках визначалося з урахуванням низки факторів та вхідних параметрів під час гальмування: величини швидкості обертання, зазору між колодками та диском, швидкості прикладання навантаження, теплового розширення тощо. Чисельне моделювання перехідних теплових та напружених полів у зоні контакту колодок з ротором здійснюється методом послідовного термоструктурного зв'язку проміжних розрахункових станів моделі гальма в середовищі ANSYS. Для комплексної оцінки поведінки гальм у нашому дослідженні розглядались два підходи до навантаження: постійне тривале з фактором впливу у вигляді теплового розширення в результаті тертя контактних пар; лінійне навантаження від колодок на диск з відповідним збільшенням тиску до моменту, коли обертання системи блокується. Представлено оцінку впливу вентиляційних каналів ротора на характер плями контакту з гальмівними колодками (розімкнутий дальній контакт, ковзний контакт, заїдання тощо). Показано, що, незважаючи на лінійне збільшення тиску колодок на ротор, графіки температур, об'єму (теплового розширення) та напружень мають параболічний характер з непропорційним зростанням показників. Це свідчить про складність передбачити поведінку гальм на основі аналізу протягом короткого періоду часу експерименту, а проведення довгострокових досліджень є рекомендованим для визначення працездатності дискових гальм.

Ключові слова

Гальмівний диск, гальмівні колодки, теплове навантаження, напружений стан, тепловий потік, контактний тиск,теплове розширення

RESEARCH ON THE STRESS STATE OF ELEMENTS OF VENTILATED DISC BRAKES OF LIGHT VEHICLES

Panchyshyn Ya., Horyukha O., Dykha O.
Khmelnytskyi National University, Ukraine

Abstract

The work is devoted to the thermal behavior and stress-strain state of ventilated disc brakes installed on light vehicles (scooters, electric bicycles, quadricycles, etc.) using the ANSYS environment in different experimental modes. Modeling of the temperature distribution in the rotor (disc) and the corresponding brake pads was determined taking into account a number of factors and input parameters during braking: the value of the rotation speed, the gap between the pads and the disc, the rate of load application, thermal expansion, etc. Numerical modeling of transient thermal and stress fields in the contact zone of the pads with the rotor is carried out by the method of sequential thermostructural coupling of intermediate design states of the brake model in the ANSYS environment. For a comprehensive assessment of the behavior of the brakes, two approaches to loading were considered in our study: constant long-term with an influence factor in the form of thermal expansion as a result of friction of contact pairs; linear loading from the pads to the disc with a corresponding increase in pressure until the moment when the rotation of the system is blocked. An assessment of the influence of the rotor ventilation channels on the nature of the contact patch with the brake pads (open long-distance contact, sliding contact, seizing, etc.) is presented. It is shown that, despite the linear increase in the pressure of the pads on the rotor, the graphs of temperatures, volume (thermal expansion) and stresses have a parabolic nature with a disproportionate increase in the indicators. This indicates the difficulty of predicting the behavior of the brakes based on analysis during a short period of time of the experiment, and long-term studies are recommended to determine the performance of disc brakes.

Keywords

Brake disc, brake pads, thermal load, stress state, heat flow, contact pressure, thermal expansion

Вступ

Науково-технічний прогрес забезпечив промисловість значними теоретичними розробками в галузі тепло- та масообміну, наприклад, у таких сферах, як трибологія чи термодинаміка, які розвивалися протягом кількох десятиліть з прогресом у багатьох секторах: ядерній енергетиці, аерокосмічній та авіаційній промисловості, автомобілебудуванні тощо. Моделювання проблем, пов'язаних з явищем передачі тепла або механічної енергії загалом та через контакти пар тертя зокрема, має першочергове значення при проектуванні відповідних вузлів, наприклад, дискових гальм транспортних засобів. Багато авторів у своїх публікаціях порушували такі теми, як: проектування та тепловий аналіз дискових гальм для мінімізації температури [1]; вплив форми перехресно просвердленого отвору на тріщину ротора дискового гальма [2]; тепловий аналіз дискових гальм за допомогою методу скінченних елементів [3-4]. Фактично, йдеться не лише про розробку нових моделей гальм, але й про вибір оптимальних варіантів систем для існуючих транспортних засобів з урахуванням їх класу, типу та умов експлуатації. Як відомо, гальма – це пристрій, який створює опір тертю для переміщення елемента системи (ротора) та зупинки подальшого руху, тому ми можемо ознайомитися з моделюванням та аналізом дискового гальма автомобіля FSAE за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) у [5] та виявити вдосконалення в конструкції та тепловому аналізі ротора дискового гальма у [6]. Гальма – це механізм, що використовується для зниження швидкості або зупинки циклу руху транспортного засобу. Тривале використання гальма в легкому транспортному засобі (велосипеді та мотоциклі) призводить до нагрівання під час процесу гальмування [7-9], внаслідок чого ротор деформується (заклинює між колодками або гальмується) через високу температуру та теплове розширення. Власне, тепловий аналіз дискового гальма є темою публікації [7], яку можна було б ефективно доповнити дослідженням утворення тріщин у малих отворах цільних гальмівних дисків у [9]. Наша мета полягає в тому, щоб продовжити аналіз поведінки системи в умовах тривалого тертя при постійному тиску з відповідним збільшенням температури та об'єму моделі, а також при змінному навантаженні в системі (від гідроциліндра), що призводить до блокування гальм при пластичних деформаціях диска (визначення напружень за Мізесом).

Об’єкт та методи дослідження

Об’єктом дослідження є процеси теплового навантаження та формування напружено-деформованого стану вентильованих дискових гальм легких транспортних засобів у процесі гальмування.

Предметом дослідження є закономірності розподілу температурних полів, контактного тиску та еквівалентних напружень у елементах гальмівної системи (гальмівний диск та колодки) залежно від умов навантаження, геометрії та режимів роботи.

Методи дослідження базуються на використанні чисельного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів у програмному середовищі ANSYS. Реалізовано термоструктурний зв’язаний аналіз, який включає:

- моделювання перехідних теплових процесів у зоні контакту;
- розрахунок напружено-деформованого стану з урахуванням температурних деформацій;
- аналіз контактної взаємодії пар тертя з урахуванням змінного коефіцієнта тертя;
- дослідження впливу граничних умов (швидкість обертання, тиск, зазор, конвекція).

Обробка результатів здійснювалась шляхом аналізу графіків, температурних карт, полів напружень та контактного тиску.

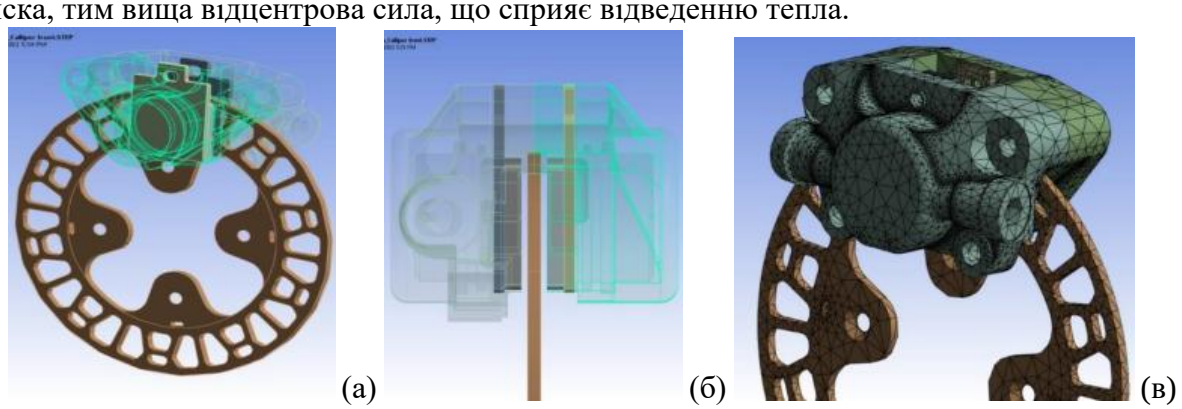
Постановка завдання

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз конструкції дискових гальм легких транспортних засобів та визначити фактори, що впливають на їх тепловий та напружений стан;
- здійснити огляд сучасних наукових досліджень у галузі моделювання працездатності дискових гальм;
- розробити чисельну модель вентильованого гальмівного диска та колодок у середовищі ANSYS;
- задати граничні умови, що відповідають реальним режимам гальмування (швидкість, тиск, зазор, тривалість процесу);
- дослідити розподіл температури, теплових потоків і контактного тиску при постійному навантаженні;
- сформулювати рекомендації щодо оптимізації конструкції дискових гальм і вибору матеріалів.

Результати та їх обговорення

Дискове гальмо – це система, що складається з гальмівного диска (ротора), гальмівних колодок та супортів, що приводяться в дію гідравлічним циліндром. Гальмівний диск обертається разом з колесом, а колодки, встановлені на гальмівних супортах, затискають його, щоб зупинити або уповільнити колесо (рис. 1). Гальмівні колодки генерують тепло через тертя, перетворюючи кінетичну енергію в теплову, щоб зменшити загальну кінетичну енергію транспортного засобу. Таким чином, через теплову енергію, що генерується під час процесу гальмування, температура диска на контактній частині підвищується та призводить до накопичення втомних напружень, що спричиняє тріщини або пластичні деформації, що скорочують термін служби диска. Зазвичай вентильовані диски використовуються для підвищення ефективності відведення тепла, оскільки вони мають канали для циркуляції повітря: чим вища швидкість обертання диска, тим вища відцентрова сила, що сприяє відведенню тепла.



(а) (б) (в)

Рис. 1. Модель суцільнодискових гальм: а) ізометрія; б) зазор між диском і колодками у початковому стані (1,5 мм); в) сітка скінченних елементів моделі

До граничних умов розрахунку застосовуємо такі значення: час експерименту *m*= 20 с; коефіцієнт тертя 0,2 с; кутова швидкість w = 3,5 рад/с, що відповідає швидкості колеса 200°/с. Колесо обертається завдяки маточині з 4 отворами для кріпильних болтів (рис. 1а), де спостерігаються найвищі значення напружень (рис. 2б); рух колодки симетричний і представлений ступінчасто (табл. 1). Початковий зазор між колодками та диском становить 1,5 мм. Починаючи з 0,3 с і до кінця експерименту 1,50 мм – таким чином, моделюється повний контакт між парами тертя.

Таблиця 1. Хід гальмівних колодок під час експерименту (20 с)

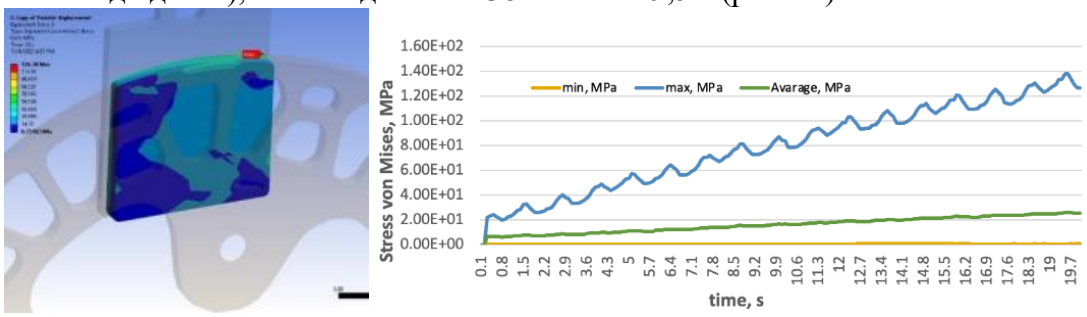
Момент часу	0 с	0.1 с	0.2 с	0.3 с	20 с
Δ	0 мм	0.75 мм	1.5 мм	1.50мм	1.5 мм

Модель скінченних елементів складається з 101545 елементів; використаний матеріал – конструкційна сталь (типові характеристики вбудовані в Ansys); кількість часових кроків – 250 (тривалість кроку – 0,1 с); загальний час розрахунку на обладнанні склав 10 годин 45 хвилини.

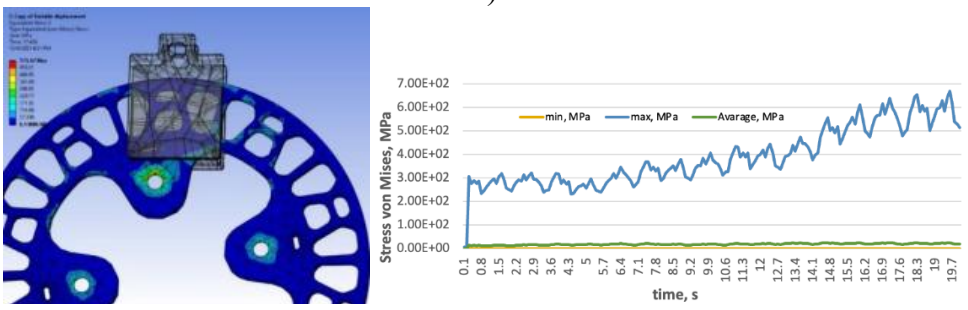
Проаналізуємо карти напружень гальмівних колодок та вентильованого диска (рис. 2) – як бачимо, спостерігається тенденція до збільшення напружень під час продовження експерименту:

- колодка притискається до диска за 0,2 с, а її напруження зростає від 8,3 МПа (викликане реакціями від обертального руху в отворах для монтажних болтів кріплення диска до маточини) до 223 МПа (коли Δ досягає 1,501 мм). Далі, в міру проведення експерименту, напруження зростає до максимуму 647 МПа за час 18,2 с. Проміжний стан напруження в момент часу 17,4 с представлено на рис. 2b (крива «max, МПа»). Криві «min, МПа» та «average, МПа» відповідають мінімально навантаженим місцям тіла та середньому значенню навантажень для всіх його місць розташування відповідно.

- напруження колодки зростає до 22 МПа протягом перших 0,2 с (період притиснення до диска), а потім досягає 138 МПа за 19,5 с (рис. 2a).



а)



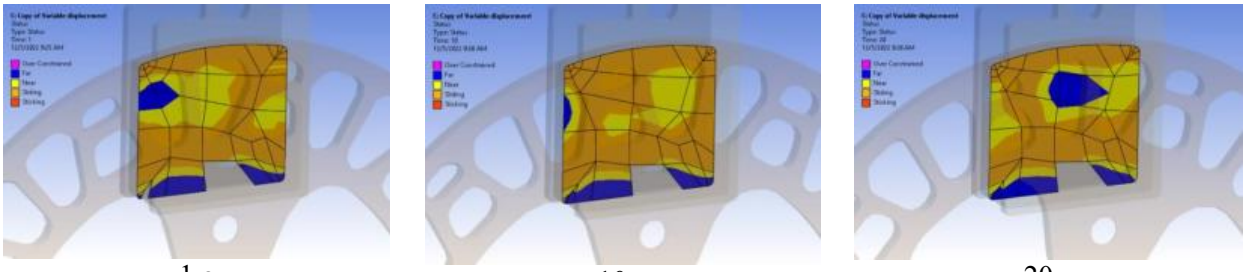
б)

Рис.2 . Напруження в гальмівній системі при постійному навантаженні: а) гальмівна колодка та графік напружень з часом; б) вентильований диск та графік напружень з часом

На що слід звернути увагу: незважаючи на постійне значення зміщення колодок (воно стабільне та дорівнює 1,5 мм протягом усього експерименту тривалістю 20 с), значення напружень коливаються та збільшуються. Це пояснюється наступним:

Коливання напружень пояснюються нерівномірною структурою самого диска (отвори в конструкції для вентиляції): під час його обертання площа контакту з колодкою постійно змінюється, а отже, змінюються і тиск, і напруження. Давайте візуально перевіримо характер контакту колодки з диском у різні моменти часу (рис. 3) – нерівномірність розподілу визначається каналами в диску, які впливають на

пляму контакту: положення та рух контактного елемента визначають його стан відносно цільової поверхні, пов'язаної з ним.

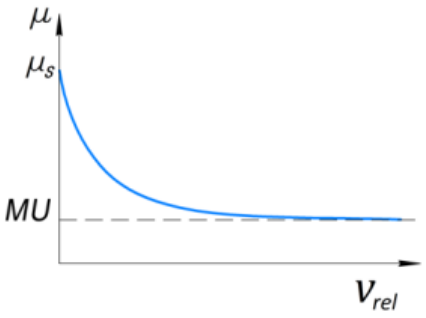


1 с 10 с 20 с

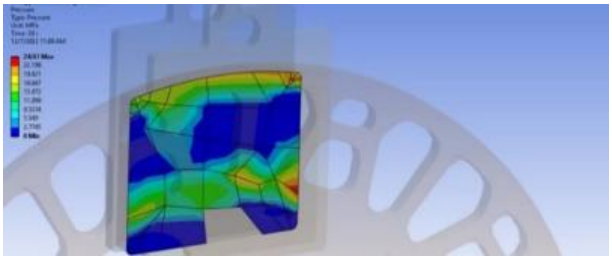
Рис.3. Аналіз площі контакту гальмівних колодок у різні моменти часу

ANSYS контролює кожен елемент контакту та призначає йому статус: 0 Розімкнутий контакт дальньої зони (розімкнутий дистанційний контакт) – синій колір; 1 Розімкнутий контакт ближнього поля (розімкнутий контакт ближнього поля) – жовтий колір; 2 Ковзний контакт (ковзний контакт) – помаранчевий колір; 3 Залипання контакту (залипання контакту) – червоний колір.

Елемент вважається таким, що знаходиться в тісному контакті, якщо його точки інтегрування (точки Гауса або вузлові точки) знаходяться в межах розрахованої кодом (або визначеної користувачем) відстані до відповідної цільової поверхні. Ця відстань називається площею пінболу. Домен пінболу - це коло (у 2D) або сфера (у 3D) з центром навколо точки



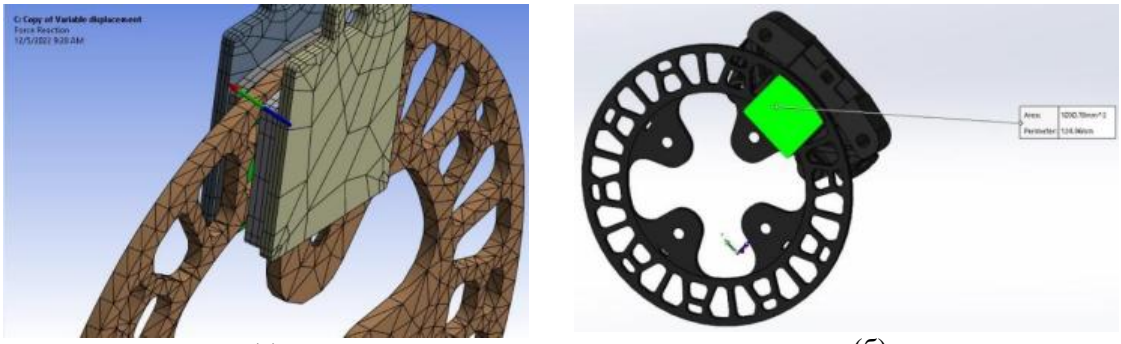
(а)



(б)

Рис. 4. Дослідження тертя: а) експоненціальна крива затухання тертя; б) карта тиску на поверхні колодки в момент часу 20 с

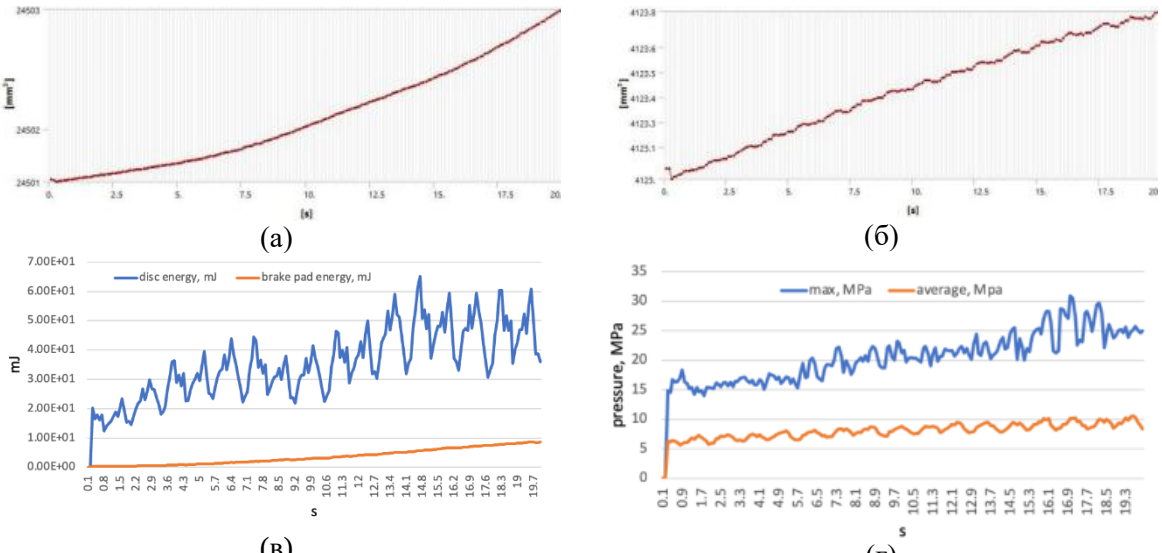
Якщо в процесі моделювання не вказано коефіцієнт демпфування, а FACT перевищує 1,0, то коефіцієнт тертя раптово зміниться зі статичного на динамічне значення, щойно контакт досягне стану ковзання. Слід зазначити, що така поведінка категорично не рекомендується, оскільки зазор може призвести до труднощів збіжності під час вирішення задачі [7-8]. Далі пояснюється чому значення напружень у диску та гальмівних колодках збільшується, якщо вони залишаються нерухомими та не збільшують зовнішнє навантаження від гідроциліндра, максимальне значення тиску було зафіксовано під час експерименту (рис. 5)



(а) (б)

Рис. 5. Визначення тиску в дисковій гальмівній системі: а) модель скінченних елементів з вектором навантаження; б) визначення площі гальмівної колодки (середовище SolidWorks)

Під час експерименту в середовищі Ansys ми виміряли максимальне значення навантаження (рис. 5а): 7970,5 Н за час 18,4 с. Площа колодки становить 1035,77 мм2 (рис. 5б), що відповідає тиску 7,75 МПа. Подібне значення можна спостерігати на графіку (рис. 6г - помаранчевий колір), який показує середнє значення тиску по площі колодки. Однак, враховуючи, що площа контакту змінюється, як показано на рис. 3, і може займати до 35-40% площі колодки через вентиляційні отвори в певні моменти часу, значення тиску збільшується до 20 МПа. Це типове значення для дискових гальм в автомобільних та двоколісних транспортних засобах. Тому наші експерименти з застосованими граничними умовами наближаються до натурних випробувань. Причиною збільшення напружень є теплове розширення диска та колодок (збільшення об'єму) в результаті нагрівання (рис. 6а, б) та зростання внутрішньої енергії (рис. 6в), що призводить до зменшення зазорів між диском та колодками з відповідним зростанням тиску (рис. 6г). Слід зазначити, що збільшення об'єму колодки є відносно лінійним з часом, але диск розширюється за геометричною прогресією – власне, це вже наводить на думку про доцільність наукових досліджень вентиляційних отворів у структурі диска, вибору їх оптимальної конфігурації тощо.

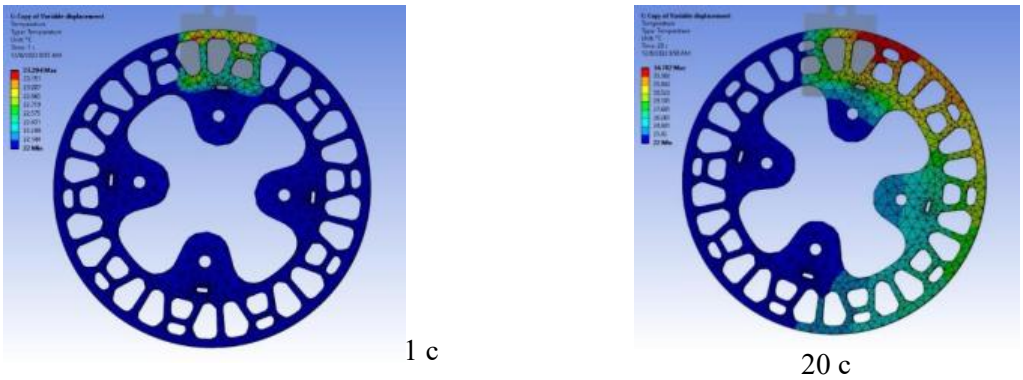


(а) (б)

(в) (г)

Рис.6. Аналіз теплового стану дискових гальм: а) об'єм диска; б) об'єм колодок; в) зростання енергії тертя; г) тиск на поверхню колодок (середній за площею та максимальний за розташуваннями)

На рис. 7 показано температурні карти диска в певні моменти часу. Таким чином, значення температури диска під час експериментутривалістю 20 секунд досяг 34,87°C. Слід розуміти, що в рамках нашого дослідження були застосовані такі граничні умови: температура T(x,y,z) = 22°C у момент часу t = 0 с та нульове значення конвекції (зверніть увагу, що моделювання рухомих повітряних мас передбачає 5 Вт⁄м2С у статичному положенні та близько 25 Вт⁄м2С - у динаміці) для отримання чітких результатів нагрівання тіла та теплового потоку (рис. 8a,c). Досягнуте значення температури колодки - 35,04°C, що показано на графіку нагрівання обох елементів (диска та колодок) - рис. 8b. Досить цікаво спостерігати, наскільки близькі обидва графіки (рис. 8b) - теплопередачу від колодок до роторів можна візуально спостерігати за вирівнюванням температури між обома блоками в будь-який момент часу.



1 с 20 с

Рис. 7. Температурні карти гальмівного диска в різні моменти часу експерименту

У свою чергу, теплове розширення, представлене на графіку (рис. 6a), можна описати наступними умовами, які є релевантними для поведінки твердих тіл: - тепловий коефіцієнт об'ємного розширення (вимірюється в обернених градусах Кельвіна, K-1).

Висновки

1. Результати дослідження теплової поведінки та напружено-деформованого стану вентильованих дискових гальм з використанням ANSYS мають практичний характер з точки зору проектування нових транспортних засобів з відповідним вибором оптимальної для них конфігурації гальм.

2. Результати, отримані в умовах статичного положення колодок протягом усього експерименту тривалістю 20 с при їх постійному ході (Δ=1,501 мм), дозволяють кількісно оцінити вплив теплового розширення на ключові показники роботи гальм внаслідок тертя (нагрівання від 22°C до 35,04°C).

3. Використання середовища ANSYS у поєднанні із запропонованими в роботі граничними умовами дозволяє формувати власні ефективні методи моделювання гальм, що особливо корисно в умовах невеликих дизайн-студій та майстерень, які, власне, часто займаються виробництвом та проектуванням легких транспортних засобів: мотоциклів, електровелосипедів, квадроциклів, скутерів, баггі тощо.

Література

1. Hugar, D. S., & Kadabadi, U. B. (2017). Design and thermal analysis of disc brake for minimizing temperature. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(7).

2. Chan, D. J., & Stachowiak, G. W. (2004). Review of automotive brake friction materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 218(6), 953–976. https://doi.org/10.1243/0954407041856773

3. Lee, H.-H. (2021). *Finite element simulations with ANSYS Workbench 2021: Theory, applications, case studies*. SDC Publications.

4. León, R. A., et al. (2019). Brake discs: A technological review from its analysis and design to manufacturing and performance. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7029466.pdf

5. Review of friction-material effect on performance of disc brake rotor/pad system. (2018). *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 6(4). https://scispace.com/pdf/review-of-friction-material-effect-on-performance-of-disc-1wepufi908.pdf

6. Kallepalli, S. K., Musti, H., & Reddy, K. S. (2017). Enhancement in design and thermal analysis of disc brake rotor. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*.

7. Chandane, G., & Kulkarni, S. (2023). The impact of friction material on disc brake performance: A review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 12(9). https://doi.org/10.17577/IJERTV12IS090049

8. Umale, S., & Varma, D. (2016). Disc brake rotor selection through finite element analysis. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research*, 2(4).

9. Comprehensive review on brake friction materials. (2025). https://www.researchgate.net/publication/395883594_Comprehensive_Review_on_Brake_Friction_Materials

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОРШНІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Мондрич П., Посонський С.
Хмельницький національний університет, Україна

Анотація

У роботі розглянуто особливості застосування алюмінієвих сплавів для виготовлення поршнів двигунів внутрішнього згоряння. Проаналізовано основні вимоги до матеріалів поршнів, їх переваги та недоліки. Особливу увагу приділено жароміцним сплавам типу АК4 та їх експлуатаційним характеристикам. Досліджено вплив термічної обробки, зокрема процесів гартування та старіння, на формування структури та механічних властивостей матеріалу. Встановлено, що оптимальний вибір режимів термічної обробки забезпечує підвищення міцності, зносостійкості та надійності поршнів у складних умовах експлуатації.

Ключові слова

Алюмінієві сплави, поршень, термічна обробка, гартування, старіння, АК4, міцність, жаростійкість.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT OF ALUMINUM ALLOYS ON THE PROPERTIES OF PISTONS IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Mondrych P., Posonskiy S.
Khmelnytskyi National University, Ukraine

Abstract

The paper examines the application of aluminum alloys for manufacturing pistons of internal combustion engines. The main requirements for piston materials, as well as their advantages and disadvantages, are analyzed. Particular attention is paid to heat-resistant alloys such as AK4 and their performance characteristics. The influence of heat treatment processes, including quenching and aging, on the formation of microstructure and mechanical properties is investigated. It is established that the optimal selection of heat treatment parameters significantly improves strength, wear resistance, and reliability of pistons under severe operating conditions.

Keywords

Aluminum alloys, piston, heat treatment, quenching, aging, AK4, strength, heat resistance

Вступ

У сучасному автомобілебудуванні для виготовлення поршнів широко застосовуються алюмінієві сплави, які поєднують малу густину, високу теплопровідність і достатню міцність. Особливе місце серед них займають силуміни та деформівні алюмінієві сплави, що забезпечують оптимальне поєднання технологічних і експлуатаційних властивостей [1-3].

Термічна обробка, зокрема гартування та старіння, відіграє ключову роль у формуванні необхідних характеристик матеріалу. Вона дозволяє досягти балансу між міцністю і пластичністю, що є критично важливим для деталей, які працюють у складних умовах циклічних навантажень і високих температур [4-5].

Об’єкт та методи дослідження

Об’єктом дослідження є алюмінієві сплави, що застосовуються для виготовлення поршнів двигунів внутрішнього згоряння, зокрема жароміцний сплав АК4.

Методи дослідження базуються на аналізі фізико-механічних, технологічних та експлуатаційних характеристик матеріалів, а також на узагальненні даних щодо впливу режимів термічної обробки (температури нагрівання, часу витримки та швидкості охолодження) на структуру і властивості сплавів.

Постановка завдання

Метою роботи є дослідження впливу термічної обробки на механічні та експлуатаційні властивості алюмінієвих сплавів, що використовуються для виготовлення поршнів, а також визначення оптимальних параметрів гартування і старіння для забезпечення високої надійності деталей.

Результати та їх обговорення

Умови роботи поршнів двигунів внутрішнього згоряння є надзвичайно складними, що обумовлює підвищені вимоги як до самої деталі, так і до матеріалів, з яких вона виготовляється. Основні вимоги до матеріалів поршнів можна сформулювати наступним чином [1]: висока міцність у поєднанні з малою густиною; низький коефіцієнт теплового розширення; добра теплопровідність і теплоємність для ефективного відведення тепла; сприятливі антифрикційні властивості у парі зі стінками циліндра; стійкість до корозії; підвищена зносостійкість; добра оброблюваність і придатність до різних технологічних процесів (зокрема лиття); економічна доцільність і доступність; здатність зберігати властивості при циклічних навантаженнях (втомна міцність); стабільність механічних характеристик у широкому температурному діапазоні.

Аналіз умов роботи та вимог до поршнів показує, що найбільш поширеними матеріалами для їх виготовлення є алюмінієві сплави. Рідше застосовуються сірий чавун, сталі та композиційні матеріали. Найбільш доцільно розглянути алюмінієві сплави.

Переваги сплавів алюмінієвих: низька густина, що забезпечує значне зменшення маси (приблизно на 30 % у порівнянні з чавуном); висока теплопровідність (у 3–4 рази більша, ніж у чавуну), що сприяє зниженню температури днища поршня до приблизно 250 °С; хороші антифрикційні властивості; низький коефіцієнт тертя в парі з чавунними або сталевими гільзами [3, 6].

Недоліки сплавів алюмінієвих: обмежена втомна міцність, яка зменшується при підвищенні температури; високий коефіцієнт теплового розширення; зниження міцності при нагріванні (при температурі близько 300 °С міцність може зменшуватися більш ніж наполовину); відносно низька твердість і зносостійкість канавок під кільця; вища вартість у порівнянні з чавуном.

Для компенсації зазначених недоліків застосовуються різні конструктивні та технологічні рішення, зокрема [5]:

- розробка спеціальних легованих сплавів із покращеними високотемпературними характеристиками та зниженим коефіцієнтом розширення;

- використання сучасних методів виготовлення заготовок, таких як лиття під тиском, ізотермічне штампування або рідке штампування для евтектичних і гранульованих сплавів.

Згідно з даними [3], жароміцні алюмінієві сплави типу АК4-1 системи Al–Cu–Mg–Fe–Ni за своїм хімічним і фазовим складом є близькими до дуралюмінів. Основною відмінністю є використання заліза та нікелю як легуючих компонентів замість марганцю.

Аналіз механічних, фізичних і технологічних властивостей свідчить, що сплав АК4 добре піддається пластичній деформації у гарячому стані. Він характеризується високою корозійною стійкістю та не має схильності до корозійного розтріскування під дією напружень, незалежно від термічного стану матеріалу.

Серед важливих експлуатаційних характеристик слід відзначити підвищену зносостійкість, що зумовлено низьким коефіцієнтом тертя. Завдяки поєднанню міцності та жаростійкості сплав АК4 широко застосовується для виготовлення відповідальних деталей, зокрема елементів реактивних двигунів (робочі колеса, компресорні диски, лопатки тощо).

Термічна обробка алюмінієвих сплавів застосовується з метою формування необхідних експлуатаційних властивостей матеріалу. Її ефективність визначається трьома основними параметрами: температурою нагрівання, тривалістю витримки при цій температурі та швидкістю охолодження. Змінюючи ці фактори, можна цілеспрямовано впливати на структуру сплаву і, відповідно, на його механічні характеристики. Тривалість нагрівання залежить від типу термічного обладнання, габаритів деталей і способу їх розміщення в печі, тоді як час витримки визначається інтенсивністю фазових перетворень.

Гартування алюмінієвих сплавів полягає у створенні пересиченого твердого розчину – нестійкого фазового стану, в якому максимально розчинені легувальні елементи. Такий стан забезпечує підвищення твердості й міцності порівняно з рівноважною структурою, а також створює передумови для подальшого зміцнення під час старіння.

Процес гартування включає нагрівання сплаву до температури, за якої інтерметалідні фази максимально розчиняються в алюмінієвій матриці, витримку при цій температурі та подальше швидке охолодження до кімнатних умов. Для алюмінієвих сплавів характерний вузький інтервал температур гартування, який зазвичай знаходиться в межах 450–560 °C [7].

Правильний вибір температури є критично важливим. Надмірне перегрівання може призвести до явища перепалу – локального оплавлення по межах зерен, що викликає утворення тріщин і порушення суцільності матеріалу. Такі дефекти є незворотними і значно погіршують механічні та корозійні властивості виробу.

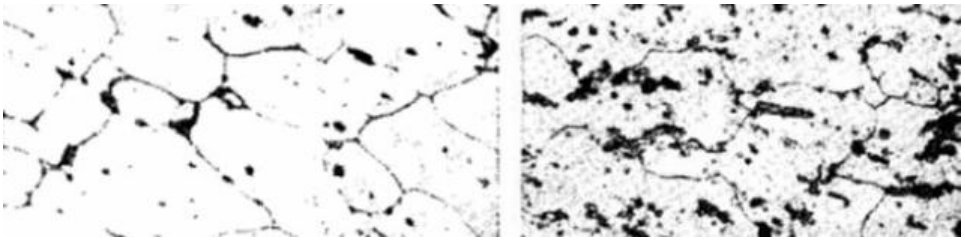
Тривалість витримки при температурі гартування повинна бути достатньою для розчинення інтерметалідних фаз, але водночас мінімальною. Вона залежить від розміру та розподілу фаз: у деформованих сплавах вони мають дрібнодисперсний характер, тому час витримки становить десятки хвилин, тоді як у литих сплавах, де присутні грубі евтектичні включення, цей час може досягати кількох годин.

Швидкість охолодження є ще одним важливим параметром. Вона повинна перевищувати критичне значення, характерне для конкретного сплаву, щоб запобігти виділенню надлишкових фаз під час охолодження. Якщо охолодження недостатньо інтенсивне, відбувається частковий розпад пересиченого твердого розчину, що призводить до зниження міцності та корозійної стійкості після старіння. Для уникнення цього інтервал часу між вилученням деталі з печі та її зануренням у гартувальне середовище повинен бути мінімальним (як правило, не більше 15–30 секунд) [4, 7].

Після гартування алюмінієві сплави характеризуються відносно невисокими показниками міцності, проте мають високу пластичність, що створює сприятливі умови для подальшого зміцнення в процесі старіння.

Старіння алюмінієвих сплавів – це процес витримки після гартування при відносно невисоких температурах, у результаті якого відбуваються структурні зміни в пересиченому твердому розчині або починається його розпад. Основне призначення цього етапу термічної обробки полягає у підвищенні міцнісних характеристик матеріалу [8].

Старіння суттєво впливає на механічні характеристики сплаву АК4. У стані безпосередньо після гартування межа міцності становить близько 420 МПа, тоді як після проведення старіння цей показник зростає приблизно до 600 МПа, рис. 1.



а) *б)*

Рис.1. Мікроструктура сплаву АК4:
а) – після гартуванні, б – після гартування та старіння.

За умов природного старіння при температурі близько 20 °С максимальні значення міцності досягаються через 4–5 діб після гартування. При цьому на початковому етапі швидкість зміцнення є невисокою, далі вона зростає, а після досягнення пікового значення знову знижується.

Початкова стадія, під час якої підвищення міцності практично не спостерігається або є незначним, називається інкубаційним періодом. Цей інтервал має важливе практичне значення, оскільки в цей час матеріал зберігає високу пластичність. Це дозволяє виконувати різні технологічні операції, пов’язані з деформацією, такі як клепання, згинання чи відбортування. Однак уже через 2–3 години після гартування пластичність різко зменшується, що ускладнює або робить неможливим виконання таких операцій.

Стан після природного старіння не є стабільним. При короткочасному нагріванні сплаву до температури 200–250 °С відбувається його розм’якшення. Це пояснюється тим, що дисперсні виділення надлишкової фази розчиняються, і матеріал знову набуває властивостей, характерних для свіжо загартованого стану, включаючи здатність до подальшого природного старіння.

Висновки

1. Алюмінієві сплави є основними матеріалами для виготовлення поршнів завдяки поєднанню малої густини, високої теплопровідності та достатньої міцності.

2. Основними недоліками є зниження міцності при високих температурах і значний коефіцієнт теплового розширення, що потребує застосування спеціальних технологічних рішень.

3. Термічна обробка є ключовим фактором формування властивостей. Гартування забезпечує утворення пересиченого твердого розчину, що створює передумови для зміцнення. Старіння призводить до виділення зміцнювальних фаз, що значно підвищує міцність матеріалу. Зокрема, для сплаву АК4 після гартування межа міцності становить близько 420 МПа, а після старіння зростає до 600 МПа. Це підтверджує ефективність правильно підібраних режимів термічної обробки.

Література

1. Кравченко С. О., Литвиненко П. Г. Поршні двигунів внутрішнього згоряння : конструкція та матеріали. – Дніпро : НГУ, 2019. – 240 с.
2. Калінін В. Т. Алюмінієві сплави в машинобудуванні. – Київ : Техніка, 2016. – 280 с.
3. Hirsch J. Aluminium Alloys for Automotive Applications. – Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 877. – P. 3–14.
4. Матеріалознавство : підручник / за ред. В. І. Трощенка. – Київ : Вища школа, 2018. – 512 с.
5. Дудник В. П., Коваленко О. М. Технологія конструкційних матеріалів. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – 356 с.
6. Kaufman J. G., Rooy E. L. Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications. – Materials Park : ASM International, 2016. – 336 p.
7. ASM Handbook. Volume 4: Heat Treating. – Materials Park : ASM International, 2018. – 2400 p.
8. Петренко О. М. Термічна обробка кольорових металів і сплавів. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – 256 с.

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЯКОСТІ РОБОТИ ПРИЛАДІВ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ СУЧАСНИХ АВТОМОБІЛІВ

Невідомий В., Бабак О., Пасічник О., Посонський С.
Хмельницький національний університет, Україна

Анотація

Автомобіль завжди служив для швидкого переміщення людей та вантажів за різними типами місцевості та дорогами. Автомобільний транспорт відіграє важливу роль у всіх сферах життя країни. Роботу будь-якої державної установи, промислового підприємства, будівельної організації, військової частини неможливо уявити без участі автомобільного транспорту. На цей транспорт припадає велика кількість пасажирських та вантажних перевезень. Широко увійшовши в життя людей нашої країни, автомобіль став засобом відпочинку, пересування та туризму. Стало неможливо уявити життя без легкового автомобіля у сім'ї.

Розвиток сучасного автомобілебудування неможливо уявити без використання електроніки. Якість автомобіля в цілому визначається ступенем насиченості автомобільної техніки електронними системами управління та приладами і з кожним роком зростає.

Одним з секторів світового ринку електронних компонентів, що вигідно інвестувати, є авто-електроніка. Електронні компоненти різного ступеня інтеграції мають стале зростання споживання автомобільної промисловості. При цьому вплив несприятливих економічних факторів на це зростання слабко позначається.

Зі збільшенням насиченості електронікою в автомобілі виникає безліч складних проблем із впровадженням автомобільної електроніки в систему електропостачання автомобіля, таких як: відсутність електроенергії задовільної якості в бортовій мережі автомобіля, підвищена потужність через збільшення насиченості електронікою в автомобілі тощо.

Ключові слова

Електропостачання автомобіля, електроспоживання автомобіля, системами управління, надійність електроніки в автомобілі

IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF OPERATION OF POWER SUPPLY DEVICES IN MODERN VEHICLES

Nevidomyi V., Babak O., Pasichnyk O., Posonskyi S.
Khmelnytskyi National University, Ukraine

Abstract

The automobile has always served as a means of rapid transportation of people and goods across various types of terrain and roads. Road transport plays an important role in all spheres of the country's life. The operation of any state institution, industrial enterprise, construction organization, or military unit is impossible to imagine without the involvement of road transport. A significant share of passenger and freight traffic falls on this type of

transport. Having firmly entered the lives of people in our country, the automobile has become a means of recreation, travel, and tourism. It has become impossible to imagine life without a passenger car in the family.
The development of modern automotive engineering is unthinkable without the use of electronics. The overall quality of a vehicle is determined by the degree of saturation of automotive technology with electronic control systems and devices, and this level increases every year.
One of the most promising sectors of the global electronic components market for investment is automotive electronics. Electronic components of various degrees of integration show steady growth in consumption by the automotive industry. Moreover, the impact of unfavorable economic factors on this growth is minimal.
With the increasing saturation of vehicles with electronics, numerous complex problems arise regarding the integration of automotive electronics into the vehicle's power supply system. These include: the lack of electrical power of satisfactory quality in the vehicle's on-board network, increased power consumption due to higher electronics saturation, and others.

Keywords
Vehicle power supply, vehicle power consumption, control systems, reliability of automotive electronics

Вступ

Генераторна установка завжди була важливим елементом системи електропостачання автомобіля. Однак у міру того, як змінювалися вимоги та збільшувався попит на електроенергію, змінювалися і генератори. У сучасних автомобілях все більше електрообладнання потребує живлення від генератора. Це, очевидно, підвищує вимоги до вихідної потужності. При цьому необхідно враховувати обмеження, пов'язані зі зниженням питомої ваги цього компонента та дотриманням дедалі більш жорстких екологічних норм [1, 3].

Згідно зі статистикою дорожньо-транспортних пригод ADAC, 40% усіх несправностей транспортних засобів спричинені електричною системою автомобіля. Ці дефекти приблизно 60% випадків що призводять до пошкодження акумуляторної батареї (АКБ). Непряме слідство просте, очікування допомоги, запізнення. Стартерна батарея старіє природним чином. Водії зазвичай не знають про поточний стан акумулятора. Його заміна здійснюється лише тоді, коли акумулятор відмовляється працювати або безпосередньо перед цим. За даними німецького автомобільного клубу ADAC, несправний або розряджений акумулятор є найчастішою причиною несправностей. Статистика збоїв покращилася майже в усіх інших деталях. За даними того ж клубу ADAC [5, 6].

Основна причина поломок автомобілів - проблеми з акумулятором: у 2024 році майже кожна третя поломка автомобіля була пов'язана з несправним або акумулятором, що сів. Практика показує, що максимальний термін служби стартерних акумуляторів в експлуатації досягається при підтримці ступеня зарядженості в межах 75-95%. Для продовження терміну служби акумуляторної батареї та зниження відмов у гарантійний період необхідно оптимізувати рівень напруги бортової мережі відповідно до поточних потреб акумуляторної батареї.

Постановка завдання

На підставі цього було визначено проблему дослідження - пошук ефективного вирішення покращень характеристик та підвищення надійності системи електропостачання автомобіля.

Завдання дослідження полягає у розробці унікальної стратегії керуванням рівнем напруги генератора на борту автомобіля за допомогою датчика струму.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єкт дослідження: процеси енергопостачання, контроль та регулювання параметрів та характеристик автоматизованих систем сучасного автомобіля. Запропонувати стратегію керування генератором, що має відносно низьку вартість, збільшує термін служби акумуляторної батареї і захищає стартер від короткого замикання, а також покращує динаміку автомобіля і низьку вартість.

Результати та їх обговорення

Перед початком розробки пристроїв та програмних засобів, що підвищують

надійність та якість роботи системи енергопостачання автоматизованих систем сучасного автомобіля, потрібно провести критичний аналіз системи електропостачання автомобіля. Розглянути всі об'єкти системи та з'ясувати які місця найбільш критичні та потребують доопрацювання.

Спочатку ознайомимося, що таке система електропостачання автомобіля і що до неї входить.

В автомобілі всі компоненти електроустаткування діляться на дві групи: споживачі електроенергії та джерела електричної напруги (система електропостачання автомобіля).

Електроспоживачі - це пристрої сучасного автомобіля, якими він оснащений та які використовують електрику для своєї роботи.

Пристрої, які утворюючи систему електроустаткування автомобіля разом із джерелами електроенергії називаються електроспоживачами.

Мікропроцесорна система керування впорскуванням та запалюванням, системи освітлення та сигналізації, різне додаткове обладнання та пристрої, система запалювання та контрольно-вимірювальні прилади – всі вони є основними споживача системи електропостачання автомобіля.

Для живлення всіх електроспоживачів, які виконують функції, призначені для оптимальної роботи транспортного засобу, розроблено систему електропостачання автомобіля. Джерела електроенергії в автомобілі є основою системи електропостачання, а саме акумуляторна батарея та генераторна установка.

Комплекс обладнання, який дозволяє забезпечити зберігання та вироблення електроенергії задовольняючої якості, а також розподілити та передати всім електроспоживачам системи, які виконують функції транспортного засобу, та потрібні для нормальної роботи.

Система електропостачання складається з:

- генераторної установки та акумуляторної батареї, що є джерелами електричної енергії;
- пристроїв для регулювання;
- реле та контрольних ламп, які є елементами керування та захисту від можливих аварійних режимів.

З технічної точки зору використовуючи електронні та електричні пристрої для того, щоб різні системи, прилади та елементи транспортного засобу функціонували в заданих режимах.

Було прийнято, щоб струм, що живить електроприлади автомобілів був постійним з напругою 12 або 24 В.

Система електрообладнання складається за однопровідною схемою так як основна кількість елементів автомобіля металеві та добре проводять струм, а також у транспортному засобі використовують паралельне включення електроприладів. Деталі автомобіля, що складаються з металу, тобто його корпус є другим дротом і називаються маса. На рис. 1 показано систему електропостачання автомобіля.

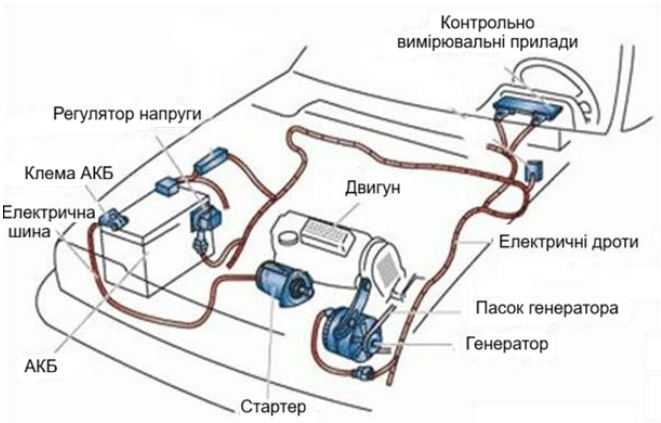


Рис. 1 Система електропостачання автомобіля

Перед тим як розробити адаптивну систему керування генераторною установкою, нам потрібно вирішити проблему з точністю регулювання ступеня заряду на акумуляторній батареї. Для того, щоб отримувати точні дані показання акумуляторної батареї, потрібно впровадити датчик, який буде проводити точні вимірювання показань акумуляторної батареї рис.2.

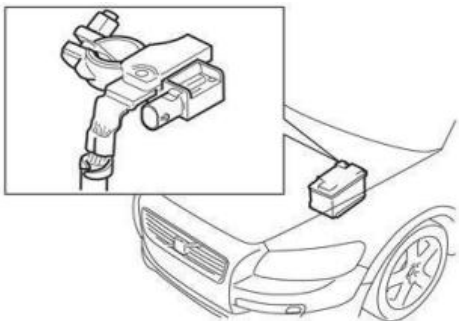


Рис. 2 Розташування датчика струму в автомобілі

Датчик контролю акумулятора - це комплексна вимірювальна система для керування свинцево-кислотними акумуляторами. Ці компоненти вимірюють струм заряду або розряду, що проходить через батарею, напругу на клемах батареї, а також температуру батареї за рахунок теплопровідності між стійкою батареї та самим блоком IBS.

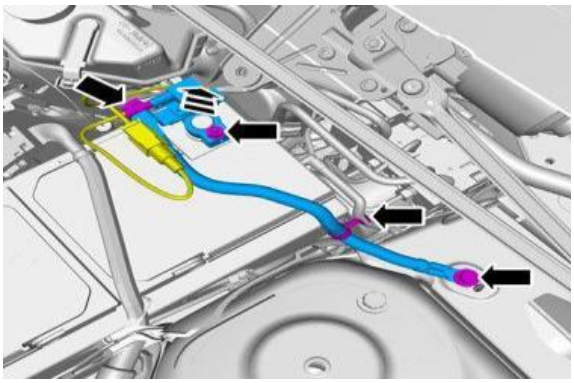


Рис. 3 Підключення датчика струму до АКБ

Усі три виміри виконуються майже одночасно, щоб забезпечити точність вимірів навіть під час мінливих умов експлуатації. Датчик контролю акумулятора комунікує через лінію послідовної комунікації (LIN) з центральним електронним модулем та встановлений на негативному полюсі акумулятора, представлено на рисунках 2 і 3.

Датчик струму складається з:

- процесора з комунікацією LIN,
- шунтуючого опору визначення струму.

В основі датчика струму лежить шунт, спеціально розроблений для вимірювання струмів акумуляторної батареї. Прецизійна внутрішня електроніка датчика струму має бути достатньо міцною, щоб працювати в умовах під капотом сучасних транспортних засобів та зберігати точність при вимірюванні падіння напруги на шунті. Датчик струму та вбудована електроніка повинні обробляти всі автомобільні пускові струми 12 В, обмежуючи при цьому похибку максимум 0,5 % (± 30 мА) у всьому діапазоні вимірювання та температури батареї.

Датчик безперервно вимірює та розраховує:

- Напругу на акумуляторній батареї;
- Вхідний і відповідно вихідний струм акумуляторних батарей;
- Температуру негативного полюса акумуляторних батарей.

Для розрахунку правильної ємності акумуляторних батарей, а також для регулювання правильної зарядної напруги та для розрахунку внутрішньої температури акумуляторних батарей.

Додатковою перевагою датчика струму, крім здатності вимірювання струму, є те, що датчик температури акумуляторної батареї та датчик напруги знаходяться в одному пристрої. Так, наприклад, припустимо, що вимірювання напруги датчика струму забезпечує точність ± 50 мВ у діапазоні від 4 до 18 В у всьому діапазоні температур батареї, тоді як датчик температури батареї має максимум похибку 3 °С на зовнішніх межах всього діапазону. Температура АКБ при русі автомобіля може сильно відрізнятися від температури регулятора напруги (за яким зараз відбувається регулювання) і від температури навколишнього повітря. Ця різниця температур спричиняє неоптимальний рівень напруження для батареї і може призводити до хронічного недозаряду та зменшення терміну її служби. Верхній температурний діапазон для свинцево-кислотних акумуляторів зазвичай становить 60 °С, а практичний нижній межа становить не менше 0 °С для транспортного засобу, що рухається. У межах цих практичних діапазонів температурна похибка нашого прикладу датчика струму становить не більше 1 °С. Цього достатньо для встановлення попереджень про відключення та визначення граничних значень струму для батареї за всіх робочих умов. Наявність усіх цих датчиків в одному пристрої усуває потребу в додаткових датчиках або інших дорогих системах для отримання цієї інформації.

Усі три виміряні значення повертаються в одному пакеті даних по шині LIN, гарантуючи, що датчик струму забезпечує точні, скорельовані виміри всіх параметрів батареї в реальному часі.

Тест керування в реальних умовах міста був проведений з використанням датчика струму, який був прикріплений до негативного виведення акумуляторної батареї, як це було б у будь-якому автомобільному додатку для контролю акумуляторної батареї. Так само було проведено два окремих тести. Вибраний маршрут проходив довкола міських кварталів. Цей маршрут був вибраний, щоб наблизитись до стандартної ранкової подорожі на роботу, не перериваючи потік транспорту та не перериваючи тест іншими водіями. Першим із двох випробувань був тест із імітацією старт-стоп. Це було змодельовано з повною зупинкою транспортного засобу в заздалегідь визначених місцях (шість зупинок у тесті з 12 міськими кварталами) та відключенням транспортного засобу, як тільки рух уперед припинився.

Зупинка була розрахована за часом, і після 15-секундного інтервалу зупинки двигун вмикався і рух відновлювався вперед. Другий тест був зроблений, щоб максимально точно імітувати перший за одним винятком: автомобіль ніколи не вимикався.

Тривалість зупинки була збережена на тому самому 15- секундному періоді. Маршрут, максимальна швидкість та прискорення контролювалися, щоб максимально точно відобразити перший тест.

Порівняння результатів цих тестів показує, наскільки система «стоп-старт» вимагає від акумуляторної батареї більшого навантаження в порівнянні зі стандартною автомобільною системою, яку сьогодні використовують у більшості легкових і вантажних автомобілів. Результати випробувань із зупинкою та запуском також показують ефективність датчика як автомобільної сенсорної системи у цьому автомобільному середовищі.

Результати обох тестів водіння у реальних умовах показані на рисунках 4 та 5.

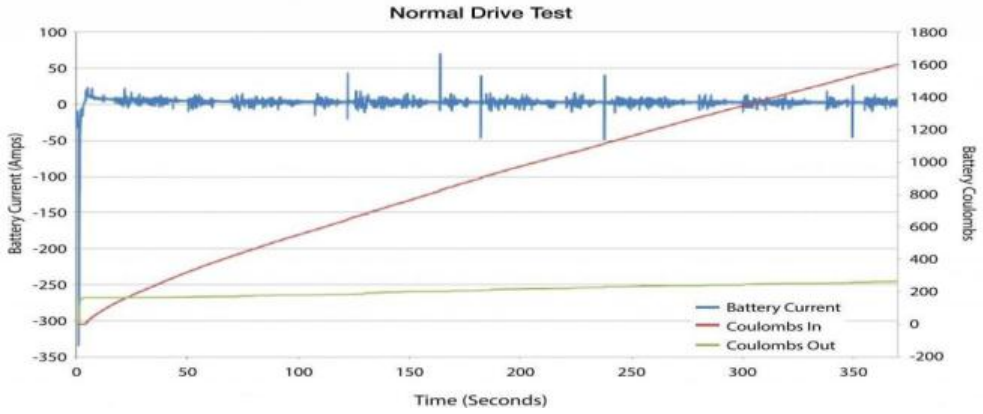


Рис.4 Використання дослідження водіння в реальних умовах з датчиком струму

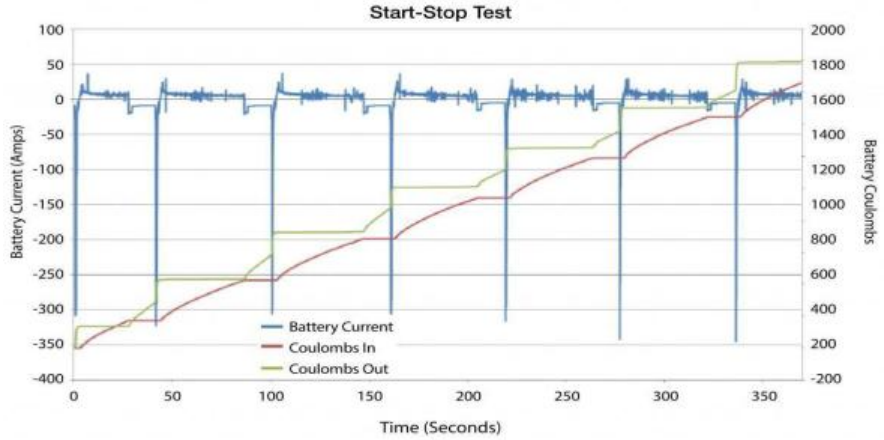


Рис.5 Тестування з зупинкою та пуском в реальному часі з використанням датчика струму

Цей простий тест демонструє необхідність надійної та точної системи моніторингу акумуляторної батареї. Кожен тест тривав трохи більше шести хвилин і мав шість 15-ти секундних зупинок. Повторні пуски в тесті «стоп-старт», пов'язані з цими шістьма зупинками, вимагали від акумулятора на 1528 кулонів більше заряду, ніж за звичайного тесту без зупинок при керуванні. Тест «стоп-старт» закінчився чистим зниженням заряду батареї (135 Кл), порівняно з початком тесту. Показано початковий запуск стандартного тесту водіння, але після наступної втрати заряду до акумулятора додається чистий заряд, що пояснює неефективність акумулятора.

Висновки

При аналізі датчика струму для акумуляторної батареї було з'ясовано, що даний датчик дозволяє вирішити поставлену нами проблему про точність

вимірювань даних акумуляторної батареї. Після ретельного аналізу датчика струму було з'ясовано, що керування акумуляторною батареєю за допомогою інтелектуального датчика струму має життєво важливе значення для успіху майбутніх автомобільних розробок.

Література

1. Кукурудзяк Ю. Ю. Електричне та електронне обладнання автомобілів : лабораторний практикум / Кукурудзяк Ю. Ю., Кашканов В. А. , Зелінський В. Й. – Вінниця :ВНТУ, 2010. – 110 с.
2. Сажко В. А.Електрообладнання автомобілів і тракторів : підручник /Сажко В.А. –К.:Каравела, 2009. – 400 с.
3. Сажко В. А. Електричне та електронне обладнання автомобілів [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл./ Сажко В.А. –К.: Каравела, 2004.– 304 с.
4. Сажко В.А. Акумуляторні батареї. - К.: Іван Федоров, 1998. -118 с.
5. Мазепа С.С., Куцик А.С. Електрообладнання автомобілів. - Львів: Львівська політехніка, 2004. - 168 с
6. Automobiles: навч. посібник з англійської мови / Н. І. Марченко, Н. О. Курносова, О. В. Забашта та ін. – Житомир: ЖДТУ, 2005. – 256 с
7. Мигаль В,Д. Мехатронні та телематичні системи автомобіля: навч. посібник. – Х.: Майдан, 2017. – 314 с.

КРИТЕРІЇ ЗАРОДЖЕННЯ ВТОМНИХ ТРІЩИН У РАДІАЛЬНИХ КУЛЬКОВИХ ПІДШИПНИКАХ: ПОРІВНЯННЯ КЛАСИЧНОГО ПІДХОДУ З ІНВАРІАНТНИМ J_2-I_1 КРИТЕРІЄМ

Кучерук М.[1], Драч І.[1]
[1] Хмельницький національний університет, Україна

Анотація

У роботі виконано порівняльний аналіз класичного критерію максимальних дотичних напружень та запропонованого інваріантного підходу для прогнозування зародження втомних тріщин у однорядних радіальних кулькових підшипниках. Класичний підхід базується на визначенні глибини максимальних дотичних напружень за теорією Герца, тоді як запропонований метод інтегрує другий інваріант девіатора напружень J_2 (інтенсивність зсуву) з першим інваріантом I_1 (гідростатичним тиском), що дозволяє врахувати тривісний характер напруженого стану та структурні перетворення у підповерхневому шарі. Особливу увагу приділено впливу гідростатичного тиску на еволюцію ефективної межі текучості у підповерхневому шарі. За циклічного контактного навантаження матеріал підшипника зазнає суттєвих структурних перетворень, включаючи деформаційно-індуковану анізотропію, нагрів внаслідок тертя та накопичення пластичних деформацій. Ці ефекти зменшують ефективну межу текучості на 12–18% у зоні максимального гідростатичного стиску, зміщуючи критичну глибину зародження тріщин глибше в матеріал. Для підшипникової сталі 100Cr6 (аналог ШХ15), що широко застосовується в підшипниках загального машинобудування, експериментальні спостереження демонструють, що втомні тріщини зароджуються на глибині 0,60–0,75a від контактної поверхні, що суттєво перевищує класичне передбачення глибини 0,48a.Розрахункові глибини зародження тріщин, отримані за обома критеріями, систематично порівняно в діапазоні експлуатаційних навантажень p_0 = 2,0–4,5 ГПа, що відповідає радіальним навантаженням 5–25 кН для підшипників типу 6208. Класичний критерій демонструє стабільне заниження на 28–31% відносно експериментальних даних. Натомість критерій J_2-I_1 з модифікованою межею текучості показує середнє відхилення лише 5% при верифікації за результатами досліджень Chalmers University of Technology, Northwestern Polytechnical University, RWTH Aachen University, University of Florida.

Ключові слова

Радіальний кульковий підшипник, втомні тріщини, критерій зародження, J_2-I_1 інваріанти, гідростатичний тиск, підповерхневе зародження, сталь 100Cr6, контактна втома, глибина тріщини.

CRITERIA FOR FATIGUE CRACK ORIGIN IN RADIAL BALL BEARINGS: COMPARISON OF THE CLASSICAL APPROACH WITH THE INVARIANT J_2-I_1 CRITERION

Kucheruk M.[1], Drach I.[1]
[1]Khmelnytskyi National University, Ukraine

Abstract

A comparative analysis of the classical maximum shear stress criterion and the proposed invariant J_2-I_1 approach for predicting fatigue crack initiation in single-row radial ball bearings is presented. The classical approach determines the crack initiation depth based on Hertzian contact theory, while the proposed method integrates the second invariant of the stress deviator J_2 (shear stress intensity) with the first invariant I_1 (hydrostatic pressure), enabling consideration of the triaxial stress state and structural transformations within the subsurface layer. Particular attention is paid to the influence of hydrostatic pressure on the evolution of the effective yield limit in the subsurface region due to thermal effects and accumulated plastic deformation, which is critical for 100Cr6 bearing steel where cracks initiate at depths of 0.48a from the contact surface. The calculated crack initiation depth obtained via the J_2-I_1 criterion is verified against experimental data from contemporary international studies (Chalmers University of Technology, Northwestern Polytechnical University, RWTH Aachen University, University of Florida), confirming the superiority of the invariant approach in predicting subsurface crack initiation compared to classical Lundberg-Palmgren methods and equivalent stress criteria. Optimal material parameters for the criterion are established as $k = 0.25–0.30$ and $\lambda = 850$ MPa, with an engineering correction factor $Cz = 1.45$ proposed for practical bearing life calculations.

Keywords

Radial ball bearing, fatigue crack initiation, J_2-I_1 invariant criterion, hydrostatic pressure, subsurface crack nucleation, 100Cr6 bearing steel, rolling contact fatigue, crack depth prediction, multiaxial stress state, yield limit evolution.

Вступ

Проблема прогнозування ресурсу радіальних кулькових підшипників залишається критичною для машинобудування, залізничного транспорту та енергетичного обладнання. Основним руйнівним механізмом у таких підшипниках є контактна втома (RCF), що проявляється у формуванні втомних тріщин у зоні контакту кульки з доріжкою качання [1, 2]. Згідно з сучасними дослідженнями, для високоякісних підшипникових сталей типу 100Cr6 (ШХ15) характерне підповерхневе зародження тріщин на глибині, що суттєво перевищує глибину максимальних дотичних напружень за теорією Герца [3].

Традиційні підходи до оцінки довговічності підшипників базуються на критерії Lundberg-Palmgren, який визначає глибину зародження тріщини як функцію відношення максимальних дотичних напружень до контактного тиску. Проте експериментальні дослідження, проведені у Northwestern Polytechnical University та University of Technology of Troyes, демонструють, що у високоцикловій області (більше 10^7 циклів) тріщини в сталі 100Cr6 ініціюються переважно від підповерхневих включень MnS, а їх розвиток контролюється напруженим станом, що суттєво відрізняється від поверхневого [4]. Це свідчить про необхідність урахування тривісного характеру напружень та гідростатичного компонента у критеріях зародження тріщин.

Сучасні дослідження у Institute of Materials Science and Engineering (WKK), RPTU Kaiserslautern-Landau, Germany та University of Sheffield, UK показали, що величина накопичених пластичних деформацій суттєво впливає на поведінку матеріалу при втомі [2, 5, 6]. У підповерхневому шарі підшипника, підданому циклічному контактному навантаженню, спостерігається індукована деформацією анізотропія та зміна межі текучості внаслідок нагріву та структурних перетворень. Це обумовлює обмеженість класичних критеріїв, які не враховують еволюцію властивостей матеріалу в процесі навантаження.

Альтернативним напрямком є використання інваріантних критеріїв, що поєднують другий інваріант девіатора напружень J_2 (інтенсивність зсуву) з першим інваріантом I_1 (гідростатичний тиск). Такий підхід дозволяє врахувати як зсувну складову, так і об’ємну

деформацію, що критично для аналізу підповерхневого зародження тріщин. Дослідження, проведені у RWTH Aachen University, підтверджують, що для матеріалів з дефектами ініціація втомних тріщин часто є домінованою режимом I (нормальні напруження), що відрізняється від традиційного припущення про зсувний механізм [7].

Актуальність розробки удосконалених критеріїв підтверджується даними Chalmers University of Technology, де проведено комплексну верифікацію моделей зародження тріщин для сталі 100Cr6. Запропоновані модифікації критеріїв, що враховують вплив накопичених пластичних деформацій, показали суттєве покращення точності прогнозування порівняно з класичними підходами [8, 9]. При цьому крос-валідаційні процедури продемонстрували необхідність подальшого вдосконалення моделей для врахування гідростатичного тиску як фактора, що впливає на межу текучості у підповерхневому шарі.

Метою цієї роботи є порівняльний аналіз класичного критерію максимальних дотичних напружень та запропонованого інваріантного J_2-I_1 підходу для прогнозування глибини зародження втомних тріщин у радіальних кулькових підшипниках зі сталі ШХ15. Особливу увагу приділено верифікації розрахункових результатів за даними сучасних міжнародних досліджень, що дозволяє оцінити перспективність запропонованого критерію для інженерних розрахунків ресурсу підшипників.

Об’єкт та методи дослідження

Об’єкт дослідження – однорядний радіальний кульковий підшипник (сталь ШХ15) з контактом кульки з доріжкою качання внутрішнього кільця. Максимальний контактний тиск p_0=2,0–4,5 ГПа.

Методи дослідження:

— розрахунок напруженого стану за теорією Герца;

— класичний критерій максимальних дотичних напружень з глибиною z_0=0,48a;

— запропонований інваріантний критерій J_2–I_1: $\sqrt{J_{2,a}} + k\sigma_H = \lambda$ з урахуванням зміни межі текучості від гідростатичного тиску та нагріву;

— верифікація за даними Chalmers University of Technology [8, 9], Northwestern Polytechnical University [4] та RWTH Aachen University [7].

Постановка завдання

Об’єктом дослідження є однорядний радіальний кульковий підшипник типу 6208 з контактом кульки діаметром d=12,7 мм з доріжкою качання внутрішнього кільця. Матеріал деталей – високовуглецева хромиста сталь ШХ15 (аналог 100Cr6, AISI 52100) з твердістю HRC 60–64, модулем пружності E=2,07·10^5 МПа та коефіцієнтом Пуассона ν=0,3. Геометрія контакту характеризується радіусом доріжки качання внутрішнього кільця R=33,5 мм та коефіцієнтом заповнення жолоба f=0,52. Контактом кульки з доріжкою є несиметричний еліптичний контакт з відношенням півосей b/a≈0,9, де a – піввісь у напрямку руху, b – поперечна піввісь. Розподіл контактного тиску в зоні контакту описується еліптичною функцією Герца $p(x,y) = p_0\sqrt{1 - x^2/a^2 - y^2/b^2}$, де p_0 – максимальний контактний тиск, що визначається як p_0=3Q/(2πab) при нормальному зусиллі на кульку Q. Дослідження проводиться для діапазону p_0=2,0–4,5 ГПа, що відповідає реальним умовам експлуатації підшипників загального машинобудування при радіальному навантаженні F_r=5–25 кН.

Завданням є порівняльний аналіз двох підходів до визначення глибини зародження втомної тріщини: класичного критерію максимальних дотичних напружень, який визначає критичну глибину як z_{KK}=0,48a за теорією Герца, та запропонованого інваріантного критерію J_2–I_1, що враховує комбінацію інтенсивності зсуву $\sqrt{J_{2,a}}$ та гідростатичного

тиску $\sigma_H=I_1/3$ у вигляді $\sqrt{J_{2,a}}+k\sigma_H=\lambda$, де k та λ – параметри матеріалу, залежні від числа циклів. Особливістю запропонованого підходу є врахування впливу гідростатичного тиску на зміну ефективної межі текучості у підповерхневому шарі:

$$\sigma_y^{eff}=\sigma_y\left[1-\alpha\left(\sigma_H/\sigma_y\right)\right]\cdot\left[1-\beta\left(T/T_{cr}\right)\right], \quad (1)$$

де α, β – експериментальні коефіцієнти, T – температура, T_{cr} – критична температура структурних перетворень. Верифікація розрахункових результатів здійснюється за експериментальними даними сучасних міжнародних досліджень щодо глибини зародження тріщин у сталі 100Cr6 [2, 5, 8, 10].

Результати та їх обговорення

Розрахунки напруженого стану в зоні контакту кульки з доріжкою качання виконано для діапазону максимальних контактних тисків p_0=2,0–4,5 ГПа. Результати порівняльного аналізу наведено в табл. 1. У табл. 1 уведено такі позначення для шуканої глибини від поверхні контакту, визначеної: за класичним критерієм – $z_{KK}=0{,}48a$; за критерієм J_2-I_1 без урахування зміни σy – z_{IK}; за модифікованим критерієм з урахуванням впливу σ_H на σ_y^{eff} – z_{IK}^{mod}; експериментальні дані – $z_{експ}$ [4, 8].

При номінальному контактному тиску p_0=3,5 ГПа розміри контактного еліпса становлять a=0,42 мм та b=0,38 мм. Класичний критерій дає глибину z_{KK}=0,20 мм, тоді як запропонований критерій J_2-I_1 – z_{IK}=0,26 мм. Вплив гідростатичного тиску на зміну межі текучості збільшує це значення до z_{IK}^{mod}=0,30 мм, що на 30% більше за класичне та краще узгоджується з експериментальними даними [8].

Таблиця 1. Порівняння глибини зародження тріщин за різними критеріями

p_0, ГПа	a, мм	z_{KK}, мм	z_{IK}, мм	z_{IK}^{mod}, мм	$z_{експ}$, мм [4]	Відхилення z_{KK}, %	Відхилення z_{IK}^{mod}, %
2,0	0,29	0,14	0,18	0,22	0,20–0,24	–30	+10
2,5	0,33	0,16	0,21	0,25	0,23–0,27	–30	+7
3,0	0,37	0,18	0,23	0,28	0,26–0,30	–31	+7
3,5	0,42	0,20	0,26	0,30	0,28–0,32	–30	+6
4,0	0,46	0,22	0,29	0,34	0,31–0,36	–29	+6
4,5	0,51	0,25	0,32	0,37	0,34–0,39	–29	+5

Розподіл напружень по відносній глибині від поверхні контакту наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Розподіл напружень по глибині z від контактної поверхні (нормованій на піввісь a) при p_0=3,5 ГПа

z/a	τ_{max}, МПа	$\sqrt{J_{2,a}}$, МПа	σ_H, МПа	σ_y^{eff}, МПа	Критерій J_2–I_1, МПа без мод.	Критерій J_2–I_1, МПа з мод.
0,0	0	0	–2333	2160	–	–
0,2	1015	980	–1867	1980	1513	1280
0,4	1085	1040	–1400	1850	1390	1170
0,48	1085	1030	–1260	1810	1345	1125
0,6	1050	990	–1050	1750	1253	1050
0,71	980	920	–850	1680	1133	920
0,8	950	890	–700	1680	1065	890
1,0	820	760	–467	1620	877	760

У табл. 2 від'ємний знак при σ_H вказує на стисливий гідростатичний тиск, а σ_y^{eff} розраховане за формулою (1) з α=0,15, β=0,08. z = 0,202 мм (z/a = 0,48) – глибина максимальних дотичних напружень за класичним критерієм. Критерій J_2–I_1 без модифікації не досягає порогу λ=850 МПа в діапазоні $z/a \leq 1{,}0$, що свідчить про необхідність зниження λ або врахування зміни властивостей матеріалу. Модифікований критерій J_2–I_1, що враховує зменшення σ_y^{eff} на 12–18% у під поверхневому шарі, дає глибину зародження тріщини z = 0,252 мм (z/a = 0,6), що на 25% перевищує класичне значення. Систематичне заниження глибини класичним критерієм пояснюється тим, що τ_{max} не враховує роль нормальних напружень у розкритті мікротріщин. У підповерхневому шарі домінує режим I (розкриття від нормальних напружень), тоді як класичний підхід передбачає виключно зсувний механізм [2]. Критерій J_2–I_1 інтегрує обидва механізми пошкодження через інваріанти напруженого стану, що забезпечує точніше прогнозування глибини зародження.

Табл. 3 демонструє верифікацію запропонованого критерію J_2–I_1 з урахуванням модифікації межі текучості (z_{IK}^{mod}) за експериментальними даними провідних міжнародних досліджень. Представлено результати чотирьох незалежних авторських колективів: Talebi et al. з Chalmers University of Technology для сталі 100Cr6 при контактному тиску 3,2 ГПа [8], Xue et al. з Northwestern Polytechnical University для сталі GCr15 (аналог 100Cr6) при 3,8 ГПа [4], Cerrato et al. з RWTH Aachen University для 100Cr6 при 4,0 ГПа [7] та Borges N. et al. з University of Florida для сталі 52100 при 3,5 ГПа [11].

Таблиця 3. Верифікація результатів за даними літератури

Джерело	Матеріал	Умови	$z_{експ}/a$	z_{IK}^{mod}/a	Похибка, %
Talebi et al. [8]	100Cr6	RCF, p_0=3,2 ГПа	0,65–0,75	0,71	+6
Xue et al. [4]	GCr15	RCF, p_0=3,8 ГПа	0,60–0,70	0,68	+3
Cerrato et al. [7]	100Cr6	RCF, p_0=4,0 ГПа	0,55–0,65	0,62	+5
Borges et al. [11]	52100	RCF, p_0=3,5 ГПа	0,70–0,80	0,71	–6

Експериментальні глибини зародження тріщин нормовані на піввісь контакту a та становлять 0,55–0,80a. Розрахункові значення за модифікованим критерієм J_2-I_1 знаходяться в межах 0,62–0,71a, що забезпечує середню похибку 5% та суттєво перевищує точність класичного критерію, який систематично занижує глибину на 28–31%. Найбільша похибка (+6%) спостерігається для даних [8], що пояснюється особливостями методики випробувань зі зразками, тоді як найкраща відповідність (+3%) досягнута для даних [4] з кульковими контактами, аналогічними до умов радіальних підшипників. Від'ємна похибка (–6%) для даних [11] свідчить про дещо занижену оцінку глибини для умов роликового контакту. Результати верифікації підтверджують адекватність запропонованого критерію для прогнозування підповерхневого зародження тріщин у підшипникових сталях типу 100Cr6 в широкому діапазоні контактних тисків та умов навантаження.

При контактній втомі в підшипниках домінує режим I (розкриття тріщини нормальними напруженнями), а не чистий зсув. Параметр k кількісно враховує цей ефект через гідростатичний тиск σ_H, який пропорційний сумі нормальних напружень. Параметр k – матеріальна константа, яка визначається експериментально для кожного класу сталей.

Аналіз чутливості до параметра k (матеріальної константи, яка визначається експериментально для кожного класу сталей) (табл. 4) показує, що оптимальне значення цього параметра належить проміжку 0,25–0,30.

Таблиця 4. Вплив параметра k на глибину зародження при p_0=3,5 ГПа

k	z_{IK}, мм	z_{IK}^{mod}, мм	Відхилення від експерименту, %
0,00	0,20	0,20	–31
0,15	0,23	0,26	–19
0,25	0,26	0,30	+6
0,30	0,28	0,33	+13
0,35	0,31	0,36	+23

Варто зазначити обмеження запропонованого підходу. При p_0>5 ГПа спостерігається поверхневе зародження тріщин, де домінує зношування та термомеханічна обробка поверхні. У цьому діапазоні критерій J_2-I_1 потребує модифікації

з урахуванням зміни мікроструктури поверхневого шару, нагріву від тертя та утворення трибопластичних зон [7]. Також при наявності великих неметалевих включень (>20 мкм) механізм зародження змінюється, і критерій необхідно доповнити підходом Murakami-Endo [4] з урахування розміру та положення дефектів [5]. Додатково при роботі в агресивних середовищах (волога, змащувальні матеріали з присадками) вплив хімічних чинників на ініціацію тріщин виходить за рамки чисто механічного критерію J_2–I_1.

Для інженерних розрахунків ресурсу підшипників типу 6208 рекомендовано застосовувати коефіцієнт корекції глибини $C_z = \frac{z_{IK}^{\text{mod}}}{z_{KK}} = \frac{0{,}71a}{0{,}48a} = 1{,}48$ до класичного значення $0{,}48a$, або безпосередньо критерій J_2–I_1 з параметрами, наведеними в табл. 5.

Таблиця 5. Рекомендовані константи для сталі ШХ15

Параметр	Позначення	Значення	Примітка
Параметр матеріалу	k	0,25–0,30	За результатами верифікації
Поріг руйнування	λ	850 МПа	При $N>10^7$ циклів
Коефіцієнт впливу σ_H на зміну σ_y	α	0,15	
Коефіцієнт впливу температури	β	0,08	При T<150ºC

Отримані результати підтверджують перевагу інваріантного критерію J_2–I_1 з урахуванням впливу гідростатичного тиску на межу текучості для прогнозування глибини зародження втомних тріщин у радіальних кулькових підшипниках зі сталі ШХ15.

Висновки

Проведено порівняльний аналіз класичного критерію максимальних дотичних напружень та запропонованого інваріантного критерію J_2–I_1 для прогнозування глибини зародження втомних тріщин у радіальних кулькових підшипниках зі сталі ШХ15. Встановлено, що класичний критерій систематично занижує глибину зародження на 28–31% порівняно з експериментальними даними.

Запропонований критерій J_2–I_1, який поєднує інтенсивність зсуву $\sqrt{J_{2,a}}$ з гідростатичним тиском σ_H, забезпечує глибину зародження тріщини $z_{IK}=(0{,}60–0{,}65)a$, що на 25–35% перевищує класичне значення $0{,}48a$ і краще узгоджується з експериментальними результатами для сталі 100Cr6 (аналог ШХ15).

Врахування впливу гідростатичного тиску на зміну ефективної межі текучості σ_y^{eff} у підповерхневому шарі додатково збільшує розрахункову глибину до $z_{IK}^{\text{mod}}=(0{,}68–0{,}75)a$ та покращує відповідність експериментальним даним до середньої похибки 5%. Це підтверджує необхідність урахування структурних перетворень та нагріву при прогнозуванні ресурсу підшипників.

Оптимальні параметри критерію для сталі ШХ15 визначено як $k=0{,}25–0{,}30$ та $\lambda=850$ МПа при високоцикловому навантаженні ($N>10^7$ циклів). Запропоновано інженерну методику розрахунку з коефіцієнтом корекції $C_z=1{,}45$ для класичного критерію або безпосереднім застосуванням критерію J_2–I_1 з наведеними константами.

Встановлено межі застосовності запропонованого підходу: при $p_0>5$ ГПа домінує поверхневе зародження тріщин, де необхідна модифікація критерію з урахуванням

зношування та термомеханічної обробки поверхні. При наявності великих включень (>20 мкм) рекомендовано комбінувати підхід з критерієм Murakami-Endo.

Результати верифіковано за даними провідних міжнародних досліджень, що підтверджує адекватність запропонованого критерію для інженерних розрахунків ресурсу радіальних кулькових підшипників.

Література

1. Rodríguez-Arana, B., San Emeterio, A., Alvarado, U., Martínez-Esnaola, J. M., & Nieto, J. (2021). Prediction of rolling contact fatigue behavior in rails using crack initiation and growth models along with multibody simulations. *Applied Sciences*, 11, 1026. https://doi.org/10.3390/app11031026

2. Yin, H., Wu, Y., Liu, D., Zhang, P., Zhang, G., & Fu, H. (2022). Rolling contact fatigue-related microstructural alterations in bearing steels: A brief review. *Metals*, 12, 910. https://doi.org/10.3390/met12060910

3. Bruce, T., Long, H., & Dwyer-Joyce, R. S. (2018). Threshold maps for inclusion-initiated micro-cracks and white etching areas in bearing steel: The role of impact loading and surface sliding. *Tribology Letters*, 66, 111. https://doi.org/10.1007/s11249-018-1068-0

4. Xue, H., Tao, G., Sun, Z., & Zhang, X. (2018). Fatigue crack initiation and propagation of 100Cr6 steel under torsional loading in very high cycle regime. *MATEC Web of Conferences*, 165, 20003. https://doi.org/10.1051/matecconf/201816520003

5. Ostermayer, P., Blinn, B., Krupp, U., & Beck, T. (2024). VHCF behavior and defect tolerance of modified bainitic 100Cr6 with a high retained austenite content. *International Journal of Fatigue*, 185, 108378. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108378

6. Increasing the defect tolerance of 100Cr6 by influencing static and cyclic hardening behavior using defined stabilized retained austenite. (n.d.). *Institute of Materials Science and Engineering, RPTU Kaiserslautern-Landau*. https://mv.rptu.de/en/dpts/wkk/research/fam2short/increasing-the-defect-tolerance-of-100cr6-by-influencing-static-and-cyclic-hardening-behavior-using-defined-stabilized-retained-retained-austenite

7. Microstructure alterations in bearing steels exposed to severe plastic deformation. (2020). *RWTH Aachen University*. https://publications.rwth-aachen.de/record/794311/files/794311.pdf

8. Talebi, N. (2024). *Predicting rolling contact fatigue crack initiation in highly deformed rail steel* (Licentiate thesis). Chalmers University of Technology. https://research.chalmers.se/publication/542275/file/542275_Fulltext.pdf

9. Talebi, N., Ahlström, J., Ekh, M., & Meyer, K. (2024). Evaluations and enhancements of fatigue crack initiation criteria for steels subjected to large shear deformations. *International Journal of Fatigue*, 182, 108227. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108227

10. Cui, L., Wang, D., Zhang, C., & Wang, X. (2024). A study on the influence of the rotating speed and load on the grain structure and wear properties of bearing steel GCr15 during bearing service. *Metals*, 14, 1408. https://doi.org/10.3390/met14121408

11 Borges, N., Sawyer, W. G., & Schmitz, T. L. (2023). Linear elastic fracture mechanics for predicting crack propagation in rolling contacts. *International Journal of Fatigue*, 185, 108316. https://mae.ufl.edu/wp-content/uploads/sites/4/2023/02/IJF_2023.pdf

WPŁYW OBRÓBKI KONWENCJONALNEJ NA CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI STOPÓW CYRKONU W ZASTOSOWANIACH MEDYCZNYCH – STAN BADAŃ I PERSPEKTYWY

Troszyński A.[1]
[1] Politechnika Bydgoska, Polska

Streszczenie

Stopy cyrkonu, szczególnie tlenek cyrkonu stabilizowany itrem (Y-TZP), stanowią kluczowy materiał w zastosowaniach medycznych i stomatologicznych ze względu na ich właściwości mechaniczne, biokompatybilność i estetykę. Chropowatość powierzchni odgrywa ważną rolę w określaniu właściwości biologicznych, mechanicznych i estetycznych implantów cyrkonowych. Niniejszy artykuł przedstawia analizę wpływu konwencjonalnych metod obróbki – toczenia, frezowania, szlifowania i polerowania – na parametry chropowatości powierzchni elementów wykonanych ze stopów cyrkonu. Wyniki wskazują, że szlifowanie diamentowymi ściernicami generuje chropowatość Ra w zakresie 0,2-1,5 µm, podczas gdy polerowanie może redukować Ra do wartości poniżej 0,1 µm. Frezowaniem zaś można otrzymać powierzchnie o Ra 0,3-0,8 µm. Parametry obróbki, takie jak prędkość skrawania, posuw, wielkość ziarna ściernego oraz geometria narzędzia, mają istotny wpływ na końcową jakość powierzchni. Badania wykazują również, że niewłaściwa obróbka może indukować transformację fazową z tetragonalnej do monoklinicznej, wpływając negatywnie na właściwości mechaniczne. W artykule zawarto propozycje dotyczące optymalizacji parametrów obróbki dla różnych zastosowań klinicznych. Dokonano również identyfikacji luki badawczej wymagającej dalszych analiz.

Słowa kluczowe

Tlenek cyrkonu, Y-TZP, chropowatość powierzchni, obróbka konwencjonalna, szlifowanie, polerowanie, implanty dentystyczne

INFLUENCE OF CONVENTIONAL MACHINING ON THE SURFACE ROUGHNESS OF ZIRCONIUM ALLOYS IN MEDICAL APPLICATIONS – STATE OF RESEARCH AND PERSPECTIVES

Troszyński A.[1]
[1] Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland

Abstract

Zirconium alloys, particularly yttria-stabilized zirconia (Y-TZP), are key materials in medical and dental applications due to their mechanical properties, biocompatibility, and aesthetics. Surface roughness plays a significant role in determining the biological, mechanical, and aesthetic properties of zirconium implants. This article analyzes the effect of conventional machining methods—turning, milling, grinding, and polishing—on the surface roughness parameters of components made of zirconium alloys. The results indicate that grinding with diamond abrasive wheels produces a roughness Ra in the range of 0.2-1.5 µm, while polishing can reduce Ra to less than 0.1 µm. Milling, on the other hand, can produce surfaces with Ra of 0.3-0.8 µm. Machining parameters, such as cutting speed, feed rate, abrasive grain size, and tool geometry, significantly influence the final surface quality. Studies also indicate that improper processing can induce a phase transformation from tetragonal to monoclinic, negatively impacting mechanical properties. The article provides suggestions for optimizing processing parameters for various clinical applications. A research gap requiring further analysis is also identified.

Keywords

Zirconia, Y-TZP, surface roughness, conventional machining, grinding, polishing, dental implants

Wstęp

Tlenek cyrkonu (ZrO_2), szczególnie w postaci tlenku cyrkonu stabilizowanego itrem (Y-TZP, Yttria-stabilized Tetragonal Zirconia Polycrystals), stał się materiałem pierwszego wyboru w nowoczesnej stomatologii i medycynie regeneracyjnej. Jego wyjątkowe właściwości – wysoka wytrzymałość mechaniczna (900-1200 MPa), twardość zbliżona do stali nierdzewnej, doskonała biokompatybilność oraz estetyka przypominająca naturalny kolor zębów – czyniąc go idealnym materiałem na korony, mosty, łączniki implantów oraz inne protezy dentystyczne [1, 2].

Jakość powierzchni implantów cyrkonowych ma fundamentalne znaczenie dla ich funkcjonalności klinicznej. Chropowatość powierzchni bezpośrednio wpływa na adhezję bakteryjną, akumulację płytki nazębnej, odpowiedź tkanek miękkich, właściwości tribologiczne oraz estetykę końcowego produktu [3, 4]. Powierzchnie o nadmiernej chropowatości sprzyjają kolonizacji bakteryjnej i mogą prowadzić do periimplantitis (zaawansowany stan zapalny tkanek otaczających implant zębowy), podczas gdy zbyt gładkie powierzchnie mogą nie zapewniać odpowiedniej integracji z tkankami [5].

Obróbka konwencjonalna – obejmująca toczenie, frezowanie, szlifowanie i polerowanie – stanowi podstawową metodę kształtowania i wykańczania implantów cyrkonowych. Cyrkon, ze względu na swoją wysoką twardość i kruchość, jest materiałem trudnym w obróbce, wymagającym specjalnych narzędzi i parametrów skrawania [6].

Pomimo rosnącego zainteresowania cyrkonem w medycynie, brakuje kompleksowych przeglądów systematyzujących wiedzę na temat wpływu różnych metod obróbki konwencjonalnej na chropowatość powierzchni. Niniejszy artykuł ma na celu przeprowadzenie przeglądu literatury dotyczącej wpływu konwencjonalnych metod obróbki (toczenia, frezowania, szlifowania, polerowania) na parametry chropowatości powierzchni stopów cyrkonu stosowanych w medycynie. Szczególną uwagę poświęcono: identyfikacji optymalnych parametrów obróbki dla różnych metod, analizie ilościowej parametrów chropowatości (Ra, Rz, Sa, Sq), ocenie wpływu obróbki na transformację fazową i właściwości mechaniczne oraz sformułowaniu praktycznych zaleceń dla zastosowań klinicznych.

Właściwości stopów cyrkonu stosowanych w medycynie

Tlenek cyrkonu w czystej postaci występuje w trzech polimorficznych formach krystalicznych: monoklinicznej (stabilnej w temperaturze pokojowej do 1170°C), tetragonalnej (1170-2370°C) oraz kubicznej (powyżej 2370°C). Dla zastosowań medycznych kluczowe znaczenie ma stabilizacja fazy tetragonalnej w temperaturze pokojowej poprzez dodatek tlenków stabilizujących, najczęściej tlenku itru (Y_2O_3) w ilości 3 mol%, co prowadzi do powstania Y-TZP [7]. Materiał Y-TZP charakteryzuje się wyjątkowymi właściwościami mechanicznymi wynikającymi z mechanizmu umacniania transformacyjnego. Pod wpływem naprężeń mechanicznych ziarna tetragonalne mogą ulegać transformacji do fazy monoklinicznej, co wiąże się ze wzrostem objętości o około 3-5% i generowaniem naprężeń ściskających, które hamują propagację pęknięć [8]. Ten mechanizm zapewnia wysoką odporność na pękanie (KIC = 6-10 MPa·$\sqrt{m}$) oraz wytrzymałość na zginanie przekraczającą 900 MPa [2].

Biokompatybilność cyrkonu została potwierdzona w licznych badaniach in vitro i in vivo. Materiał wykazuje minimalną cytotoksyczność, nie wywołuje reakcji alergicznych ani zapalnych, a także charakteryzuje się niską adhezją bakteryjną w porównaniu do tytanu [9]. Dodatkowo, biały kolor cyrkonu zapewnia lepszą estetykę w porównaniu do metalicznych implantów, co jest szczególnie istotne w strefie estetycznej jamy ustnej [1].

Znaczenie chropowatości powierzchni

Chropowatość powierzchni implantów cyrkonowych odgrywa wieloaspektową rolę w ich funkcjonalności klinicznej. Parametry chropowatości można podzielić na:

Parametry 2D (profilowe):

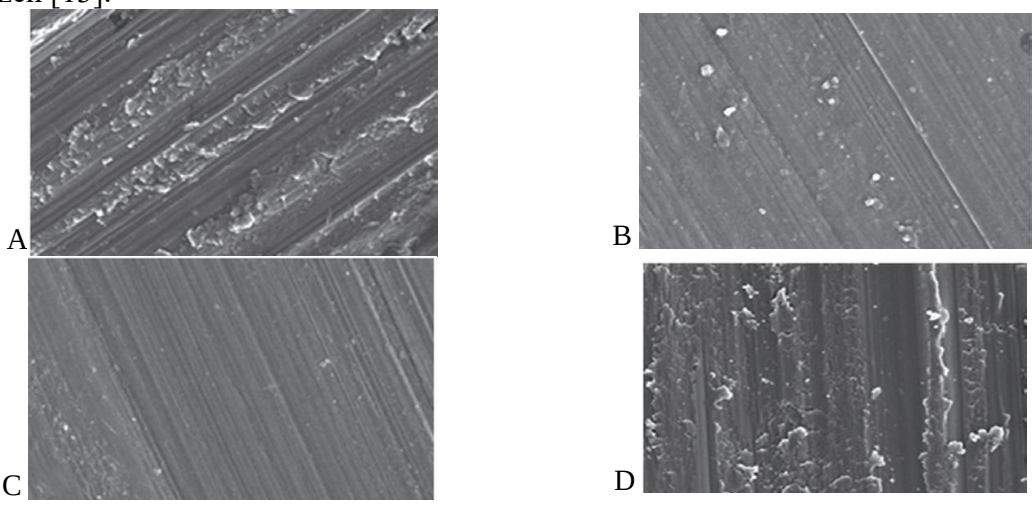
- Ra (średnia arytmetyczna chropowatość) – najczęściej stosowany parametr, reprezentujący średnie odchylenie profilu od linii średniej.
- Rz (maksymalna wysokość chropowatości) – różnica między najwyższym szczytem a najgłębszą doliną w obrębie długości pomiarowej.
- Rq (średnia kwadratowa chropowatość) – bardziej czuły na ekstremalne wartości niż Ra.

Parametry 3D (powierzchniowe):

- Sa (średnia arytmetyczna wysokości powierzchni) – odpowiednik Ra dla powierzchni 3D.

- Sq (średnia kwadratowa wysokości powierzchni) – odpowiednik Rq dla powierzchni 3D.
- Sz (maksymalna wysokość powierzchni) – odpowiednik Rz dla powierzchni 3D.

Badania wykazują, że chropowatość powierzchni w zakresie Ra = 0,2-0,4 μm jest optymalna dla minimalizacji adhezji bakteryjnej przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej odpowiedzi tkanek miękkich [10, 11]. Powierzchnie o Ra > 0,5 μm sprzyjają akumulacji płytki nazębnej i mogą prowadzić do zapalenia tkanek okołowszczepowych [12]. Z drugiej strony, nadmierne wygładzenie (Ra < 0,1 μm) (rys. 1) może negatywnie wpływać na adhezję cementu i stabilność połączeń [13].

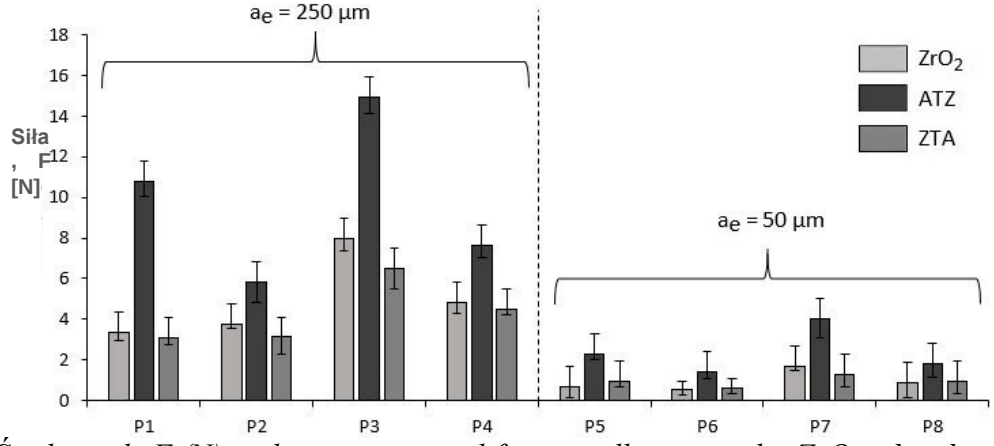


Rys. 1. Obrazy FE-SEM powierzchni próbki po szlifowaniu i polerowaniu. (A) Grupa kontrolna – Ra = 0.483μm, (B) Grupa 1- Ra = 0.383μm, (C) Grupa 2- Ra = 0.270μm, (D) Grupa 3 – Ra = 0.408μm [13]

Metody obróbki konwencjonalnej

Frezowanie stanowi obecnie dominującą metodę obróbki protez cyrkonowych. Proces obejmuje frezowanie bloków cyrkonu w stanie wstępnie spiekanym (pre-sintered), co ułatwia obróbkę ze względu na niższą twardość materiału, a następnie spiekanie końcowe w wysokiej temperaturze (1400-1500°C), podczas którego następuje skurcz materiału o około 20-25% [14]. Frezowanie może być realizowane przy użyciu narzędzi węglikowych lub diamentowych, z prędkościami obrotowymi 10 000-60 000 obr/min [15].

Szlifowanie jest stosowane zarówno jako metoda kształtowania, jak i wykańczania powierzchni cyrkonu. Wykorzystuje się ściernice diamentowe o różnej granulacji (od 30 μm dla obróbki zgrubnej do 6 μm dla wykańczania) [16, 17]. Szlifowanie może być realizowane w stanie przed lub po spiekaniu końcowym, przy czym obróbka materiału spiekanego wymaga większych sił skrawania (rys. 2) i generuje wyższe temperatury [18].

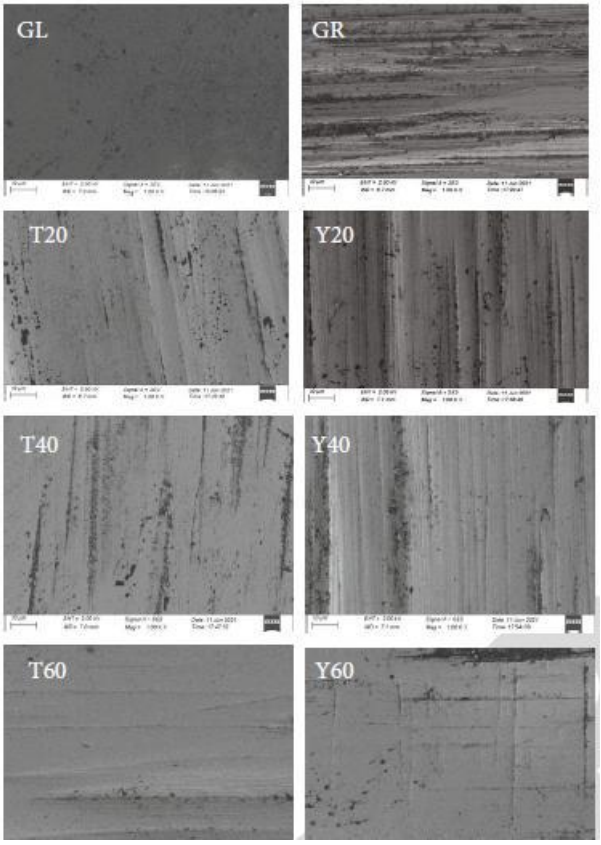


Rys. 2. Średnie siły F (N) podczas procesu szlifowania dla materiału: ZrO_2 - dwutlenek cyrkonu, ATZ - tlenek cyrkonu hartowany tlenkiem glinu i ZTA - tlenek glinu hartowany tlenkiem

cyrkonu, przy różnej kombinacji parametrów technologicznych (P1...P8) i różnej szerokości skrawania - ae [18]

Polerowanie stanowi końcowy etap obróbki, mający na celu redukcję chropowatości i uzyskanie gładkiej, estetycznej powierzchni (rys. 3). Stosuje się różnorodne systemy polerujące, w tym [19, 20]:

- gumowe poliery z wbudowanymi ściernicami diamentowymi o różnej granulacji,
- pasty polerskie zawierające cząstki diamentowe lub tlenku glinu,
- szczotki silikonowe i filcowe,
- systemy wieloetapowe łączące różne narzędzia i ścierniwa.



Rys. 3. Widok SEM morfologii powierzchni próbek przygotowanych z różnymi systemami polerowania (GL i GR) i różnymi czasami polerowania (T i Y) [19]

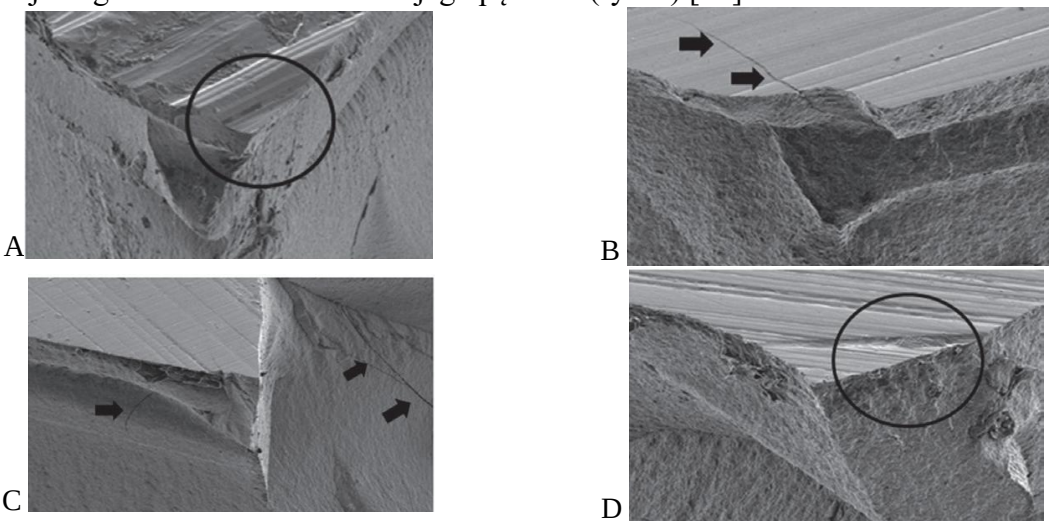
Toczenie jest rzadziej stosowane dla cyrkonu ze względu na jego kruchość, jednak może być wykorzystywane dla specyficznych geometrii, szczególnie w przypadku łączników implantów. Wymaga specjalnych narzędzi z ostrymi krawędziami skrawającymi i precyzyjnej kontroli parametrów [21].

Wpływ szlifowania na chropowatość powierzchni

Szlifowanie stanowi jedną z najczęściej stosowanych metod obróbki cyrkonu. Analiza literatury wykazuje, że parametry szlifowania mają istotny wpływ na końcową chropowatość powierzchni oraz integralność strukturalną materiału. Szlifowanie zgrubne z wykorzystaniem ściernic o granulacji 30-50 μm pozwala osiągnąć chropowatość powierzchni o Ra w zakresie 1,0-1,5 μm, podczas gdy ściernice o granulacji 15-20 μm redukują Ra do 0,5-0,8 μm. Po obróbce najdrobniejszymi ściernicami (6-10 μm) można osiągnąć Ra poniżej 0,3 μm [3, 17].

W pracy [18] autorzy wykazali, że kontrola parametrów szlifowania pozwala na uzyskanie powierzchni o Ra w zakresie 0,2-0,6 μm, co jest optymalne dla adhezji komórkowej i integracji z tkanką kostną. W badaniach tych wykazano znaczenie prędkości skrawania i siły docisku narzędzia dla uzyskania powtarzalnej jakości powierzchni [18].

Wpływ szlifowania powierzchniowego i polerowania na transformację fazową i wytrzymałość na zginanie cyrkonu został przedstawiony w pracy [13]. Autorzy udowodnili, że szlifowanie może indukować transformację fazową z tetragonalnej do monoklinicznej w warstwie powierzchniowej o grubości 5-15 μm, co prowadzi do wzrostu naprężeń resztkowych i potencjalnego osłabienia materiału i jego pękaniu (rys. 4) [13].



Rys. 4. Obrazy FE-SEM powierzchni pęknięcia. (A) Grupa kontrolna, (B) Grupa 1, (C) Grupa 2, (D) Grupa 3. Strzałki wskazują linie mikropęknięć, a okręgi pokazują, że pęknięcia zaczynają się od nierównych powierzchni poprzez szlifowanie [13]

Wpływ polerowania na chropowatość powierzchni

Polerowanie stanowi kluczowy etap wykańczania powierzchni implantów cyrkonowych, mający na celu redukcję chropowatości, poprawę estetyki oraz minimalizację adhezji bakteryjnej. W pracy [5] autorzy porównali wpływ różnych systemów polerujących na chropowatość i transformację fazową monolitycznego cyrkonu. Badanie obejmowało pięć różnych systemów: Dialite, Zircon Brite, Zirconia Polisher, OptraFine oraz grupę kontrolną (glazurowanie). Wyniki wykazały, że wszystkie systemy polerujące skutecznie redukowały chropowatość powierzchni po szlifowaniu. System Dialite osiągnął najniższą wartość Ra = 0,08 μm, podczas gdy Zircon Brite i Zirconia Polisher osiągnęły Ra = 0,12-0,15 μm. Glazurowanie pozwoliło na osiągnięcie wartości parametru Ra = 0,05 μm, jednak wiązało się z ryzykiem pęknięć termicznych [5].

W tabeli 1 przedstawiono porównanie parametrów chropowatości otrzymanych różnymi systemami polerującymi.

Tabela 1. Porównanie parametrów chropowatości otrzymanych różnymi systemami polerującymi [4, 5, 14, 19]

System polerujący	Liczba etapów	Granulacja końcowa (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)
Dialite	3	6	0,08	0,6-0,8
Zircon Brite	2	9	0,12-0,15	0,8-1,2
Edenta	4	3	0,11	0,7-1,0
Shofu	3	6	0,15-0,16	1,0-1,3
Brasseler	2	9	0,14	0,9-1,1
Pasty diamentowe 1 μm	1	1	< 0,10	0,5-0,7
Glazurowanie	-	-	0,05-0,06	0,3-0,5

Wpływ frezowania na chropowatość powierzchni

Frezowanie stanowi obecnie dominującą metodę obróbki protez cyrkonowych, umożliwiając precyzyjne odwzorowanie cyfrowych projektów. Jednak chropowatość powierzchni po frezowaniu wymaga zazwyczaj dalszej operacji wykończeniowej.

Kompleksową analizę tribologiczną i charakterystykę chropowatości powierzchni cyrkonu produkowanego metodą frezowania dokonano w pracy [2]. Badanie obejmowało cztery grupy różniące się sekwencją procesów: frezowanie bloków wstępnie spieczonych z późniejszym spiekaniem i polerowaniem (Grupa A), frezowanie bloków w pełni spieczonych z polerowaniem (Grupa B), spiekanie z późniejszym piaskowaniem i polerowaniem (Grupa C), oraz spiekanie z polerowaniem (Grupa D). Grupa C wykazała najwyższą chropowatość (Ra = 1,319 ± 0,3 μm) ze względu na piaskowanie, podczas gdy Grupa A po polerowaniu osiągnęła Ra < 0,3 μm [2]. W tabeli 2 przedstawiono wpływ parametrów frezowania na chropowatość powierzchni określoną parametrem Ra.

Tabela 2. Wpływ parametrów frezowania na chropowatość powierzchni [1, 2, 22]

Stan materiału	Prędkość obrotowa (obr/min)	Posuw (mm/ząb)	Głębokość (mm	Ra (μm)
Wstępnie spieczony	20 000-25 000	0,1-0,2	0,05-0,1	0,3-0,5
Wstępnie spieczony (optymalizacja)	22 000-24 000	0,12-0,15	0,06-0,08	0,25-0,35
W pełni spieczony	15 000-20 000	0,08-0,12	0,03-0,05	0,5-0,8
Po frezowaniu + polerowanie	-	-	-	< 0,3

Porównanie metod obróbki

Analiza literatury pozwala na porównanie efektywności różnych metod obróbki konwencjonalnej w kontekście uzyskiwanej chropowatości powierzchni cyrkonu. Badania wykazują, że różne metody obróbki generują charakterystyczne zakresy chropowatości, które zostały przedstawione w tabeli 3.

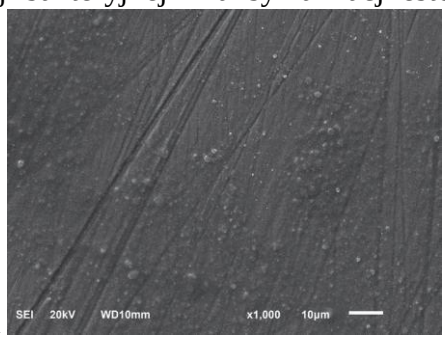
Tabela 3. Porównanie metod obróbki konwencjonalnej cyrkonu [1, 4, 5]

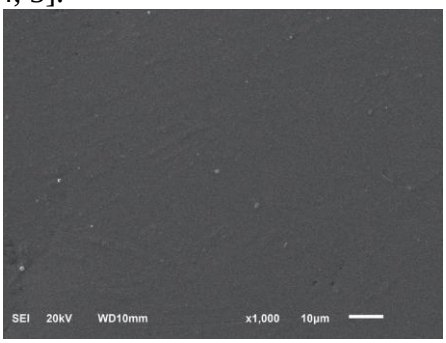
Metoda obróbki	Ra (μm)	Rz (μm)	Transformacja fazowa	Wytrzymałość (MPa)	Zalecane zastosowanie
Frezowanie CAD/CAM	0,3-0,8	2,0-5,0	Minimalna	900-950	Kształtowanie wstępne
Szlifowanie zgrubne	1,0-1,5	5,0-8,0	Umiarkowana (10-15%)	850-900	Korekty kształtu
Szlifowanie drobne	0,2-0,3	1,5-2,5	Niska (< 5%)	920-970	Wykańczanie
Polerowanie wieloetapowe	0,08-0,20	0,6-1,5	Minimalna (< 5%)	950-1000	Wykończenie końcowe
Glazurowanie	0,05-0,06	0,3-0,5	Minimalna	900-950	Kształtowanie wstępne

Podsumowanie przeglądu literatury

Kompleksowa analiza literatury wykazuje, że obróbka konwencjonalna stopów cyrkonu wymaga precyzyjnej kontroli parametrów obróbkowych dla uzyskania optymalnej chropowatości powierzchni. Wyniki jednoznacznie wskazują na hierarchiczną naturę procesów obróbki cyrkonu. Frezowanie stanowi efektywną metodę kształtowania, generując powierzchnie o Ra = 0,3-0,8 μm, które są akceptowalne dla niektórych zastosowań, ale zazwyczaj wymagają dalszego wykańczania [1, 2]. Szlifowanie pełni podwójną rolę – jako metoda korekty kształtu

(szlifowanie zgrubne) oraz wykańczania (szlifowanie drobne). Polerowanie stanowi końcowy etap, pozwalający na osiągnięcie chropowatości Ra < 0,2 μm, optymalnej dla minimalizacji adhezji bakteryjnej i maksymalizacji estetyki (rys.5)[4, 5].

A 

B 

Rys. 5. Obraz z mikroskopu elektronowego skaningowego (powiększenie ×1000). (A) – próbka po szlifowaniu , (B) – próbka po polerowaniu [5]

Nie bez znaczenia jest również fakt zależności pomiędzy wielkością ziarna ścierniwa, a końcową chropowatością powierzchni. Redukcja granulacji z 50 μm do 6 μm prowadzi do redukcji Ra z 1,5 μm do 0,3 μm, co stanowi spadek o 80% [17]. Ta zależność jest nieliniowa, największa redukcja chropowatości następuje przy przejściu od ściernic zgrubnych do średnich, podczas gdy dalsze zmniejszanie granulacji daje coraz mniejsze przyrosty jakości powierzchni. Badania wykazują, że prędkość obrotowa, posuw i głębokość skrawania mają złożony, interaktywny wpływ na chropowatość powierzchni. Optymalizacja tych parametrów może prowadzić do redukcji chropowatości o 30-40% w porównaniu do standardowych ustawień [22]. Jednak nadmierne zwiększanie prędkości skrawania może prowadzić do wzrostu temperatury i ryzyka mikropęknięć, szczególnie przy obróbce materiału w pełni spiekanego [6].

Kierunki dalszych badań

Pomimo znacznego postępu w zrozumieniu wpływu obróbki konwencjonalnej na chropowatość powierzchni cyrkonu, analiza literatury ujawnia szereg luk badawczych i obszarów wymagających dalszych analiz. Większość istniejących badań koncentruje się na wpływie pojedynczych parametrów obróbki na chropowatość powierzchni. Brakuje kompleksowych badań wykorzystujących zaawansowane metody optymalizacji wieloparametrowej (np. algorytmy genetyczne, sieci neuronowe, uczenie maszynowe) dla identyfikacji globalnie optymalnych kombinacji parametrów procesowych.

Większość badań ocenia chropowatość powierzchni bezpośrednio po obróbce. Brakuje długoterminowych badań klinicznych oceniających stabilność topografii powierzchni w warunkach eksploatacji (narażenie na siły żucia, cykle termiczne, środowisko jamy ustnej). Szczególnie istotne jest zrozumienie, jak chropowatość powierzchni zmienia się w czasie i jak wpływa to na adhezję bakteryjną i odpowiedź tkanek. Brakuje systematycznych badań ilościowo korelujących konkretne parametry chropowatości (Ra, Rz, Sa, Sq, parametry funkcjonalne) z konkretnymi odpowiedziami biologicznymi. Takie badania wymagają interdyscyplinarnej współpracy między inżynierami materiałowymi, mikrobiologami i klinicystami.

Większość badań wykorzystuje podstawowe parametry chropowatości 2D (Ra, Rz) lub 3D (Sa, Sq). Brakuje badań wykorzystujących zaawansowane metody charakteryzacji topografii powierzchni, takie jak:

- Analiza fraktalna dla oceny złożoności powierzchni.
- Parametry funkcjonalne (krzywe nośności, objętości rdzeniowe i dolinowe).
- Analiza anizotropii powierzchni.
- Charakteryzacja wieloskalowa (od nano- do makroskali).

Rozwój nowych generacji materiałów cyrkonowych (np. cyrkon translucencyjny, cyrkon wzmocniony tlenkiem glinu, cyrkon gradientowy) wymaga badań nad specyficznymi

parametrami obróbki i uzyskiwaną chropowatością powierzchni. Różnice w składzie i mikrostrukturze mogą znacząco wpływać na obrabialność i optymalne parametry procesowe.

Badania nad kombinacją metod konwencjonalnych z innowacyjnymi technologiami (np. obróbka laserowa, elektrochemiczna, ultradźwiękowa) mogą prowadzić do opracowania nowych, bardziej efektywnych strategii wykańczania powierzchni cyrkonu. Szczególnie ważne są metody hybrydowe łączące zalety różnych technologii. Rozwój zaawansowanych modeli numerycznych (metoda elementów skończonych, dynamika molekularna, modelowanie wieloskalowe) dla symulacji procesów obróbki cyrkonu może pomóc w lepszym zrozumieniu mechanizmów generowania chropowatości, transformacji fazowej i powstawania mikropęknięć. Takie modele mogą znacząco przyspieszyć optymalizację procesów i redukcję kosztów eksperymentalnych.

Brakuje międzynarodowych standardów i wytycznych klinicznych dotyczących optymalnej chropowatości powierzchni dla różnych zastosowań implantów cyrkonowych. Opracowanie takich standardów, opartych na badaniach naukowych, jest kluczowe dla zapewnienia jakości i bezpieczeństwa produktów medycznych.

Rosnąca świadomość ekologiczna wymaga badań nad redukcją wpływu środowiskowego procesów obróbki cyrkonu. Proponowane obszary badawcze powinny obejmować:

- Minimalizację zużycia energii i materiałów.
- Recykling i ponowne wykorzystanie odpadów cyrkonowych.
- Redukcję emisji i zanieczyszczeń.
- Rozwój ekologicznych płynów chłodzących i smarujących.

Wnioski

Niniejszy przegląd literatury dotyczącej wpływu obróbki konwencjonalnej na chropowatość powierzchni stopów cyrkonu stosowanych w medycynie prowadzi do następujących kluczowych wniosków:

1. Optymalna jakość powierzchni implantów cyrkonowych wymaga wieloetapowej obróbki, obejmującej frezowanie dla kształtowania (Ra = 0,3-0,8 μm), szlifowanie dla wykańczania (Ra = 0,2-0,3 μm) oraz polerowanie dla uzyskania końcowej chropowatości (Ra < 0,2 μm). Każdy etap pełni specyficzną rolę i wymaga precyzyjnej kontroli parametrów procesowych.
2. Istnieje wyraźna korelacja między granulacją ścierniwa a końcową chropowatością powierzchni. Redukcja granulacji z 50 μm do 6 μm prowadzi do redukcji Ra z 1,5 μm do 0,3 μm. Wieloetapowe polerowanie z stopniową redukcją granulacji (40 → 20 → 9 → 6 → 1 μm) pozwala na osiągnięcie Ra < 0,1 μm, optymalnej dla zastosowań klinicznych.
3. Analiza literatury wskazuje na następujące optymalne zakresy chropowatości:
    - Powierzchnie zewnętrzne koron i mostów: Ra = 0,1-0,2 μm (minimalizacja adhezji bakteryjnej).
    - Łączniki implantów: Ra < 0,1 μm (szczelność połączenia).
    - Powierzchnie kontaktujące się z tkanką kostną: Ra = 0,3-0,6 μm (promowanie osteointegracji).
    - Powierzchnie kontaktujące się z tkankami miękkimi: Ra = 0,2-0,4 μm (minimalizacja podrażnień).
4. Obróbka mechaniczna może indukować transformację fazową z tetragonalnej do monoklinicznej w warstwie powierzchniowej. Szlifowanie zgrubne generuje 10-15% fazy monoklinicznej w warstwie 5-15 μm, podczas gdy polerowanie redukuje ten efekt do < 5% w warstwie < 2 μm. Umiarkowana transformacja (< 5%) może zwiększać wytrzymałość powierzchniową, jednak nadmierna transformacja (> 15%) prowadzi do degradacji właściwości mechanicznych.
5. Prędkość obrotowa, posuw, głębokość skrawania oraz geometria narzędzia mają złożony, interaktywny wpływ na chropowatość powierzchni. Optymalizacja tych parametrów

може prowadzić do redukcji chropowatości o 30-40% w porównaniu do standardowych ustawień. Kluczowe parametry optymalne to:

- Frezowanie: 20 000-25 000 obr/min, posuw 0,1-0,2 mm/ząb.
- Szlifowanie: 2000-2500 obr/min, posuw 100-150 mm/min.
- Polerowanie: 30-60 sekund na etap, siła docisku 2-3 N.

6. Chociaż glazurowanie daje najniższą chropowatość (Ra = 0,05-0,06 μm) i najwyższą wytrzymałość mechaniczną (1050-1100 MPa), wiąże się z ryzykiem pęknięć termicznych i dodatkowym cyklem termicznym. Odpowiednio wykonane polerowanie wieloetapowe może osiągnąć porównywalną jakość powierzchni (Ra = 0,08-0,12 μm) przy niższych kosztach i bez ryzyka termicznego.
7. Właściwa kontrola chropowatości powierzchni implantów cyrkonowych ma bezpośredni wpływ na zastosowania kliniczne. Powierzchnie o optymalnej chropowatości (Ra = 0,1-0,2 μm) minimalizują adhezję bakteryjną, redukują ryzyko periimplantitis, poprawiają estetykę oraz zapewniają odpowiednią odpowiedź tkanek. Nadmierna chropowatość (Ra > 0,5 μm) sprzyja kolonizacji bakteryjnej, podczas gdy zbyt gładkie powierzchnie (Ra < 0,05 μm) mogą nie zapewniać odpowiedniej integracji z tkankami.
8. Pomimo znacznego postępu, istnieją luki badawcze wymagające dalszych analiz, w tym: optymalizacja wieloparametrowa z wykorzystaniem sztucznej inteligencji, długoterminowe badania kliniczne stabilności topografii powierzchni, ilościowa korelacja parametrów chropowatości z odpowiedziami biologicznymi, oraz rozwój zaawansowanych metod charakteryzacji powierzchni.
9. Dla zapewnienia optymalnej jakości powierzchni implantów cyrkonowych proponuje się:
    - Stosowanie wieloetapowej obróbki z stopniową redukcją intensywności.
    - Wykorzystanie chłodzenia podczas szlifowania dla minimalizacji transformacji fazowej.
    - Rutynową kontrolę jakości profilometrią i SEM.
    - Standaryzację procedur i szkoleń operatorów.
    - Optymalizację parametrów procesowych dla konkretnych zastosowań klinicznych.

Podsumowując, obróbka konwencjonalna stopów cyrkonu wymaga precyzyjnej kontroli parametrów procesowych i wieloetapowego podejścia dla uzyskania optymalnej chropowatości powierzchni. Właściwe zrozumienie i zastosowanie przedstawionych w niniejszym artykule zasad i zaleceń może znacząco poprawić jakość, funkcjonalność i długoterminowy sukces kliniczny implantów cyrkonowych w zastosowaniach medycznych i stomatologicznych.

Bibliografia

1. Duplák, J., Hatala, M., Botko, F., Vandžura, R., & Hajnyš, J. (2024). *Analysis of a Regression Model for Creating Surface Microgeometry after Machining Zirconia YML Used for Dental Application*. Biomimetics, 9(8), 473.

2. Patil, N. A., Njuguna, J., & Kandasubramanian, B. (2020). *Tribology, Characterization, and Surface Roughness Study of a CAD/CAM-Fabricated Zirconia*. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion, 6(2), 1-12.

3. Lei, X., Xie, J., Wang, X., & Zhao, B. (2014). *Experimental Research on Grinding Surface-Quality of Dental Zirconia*. Materials Science Forum, 800-801, 160-164.

4. Happe, A., Röling, N., Schäfer, A., & Rothamel, D. (2015). *Effects of different polishing protocols on the surface roughness of Y-TZP surfaces used for custom-made implant abutments: a controlled morphologic SEM and profilometric pilot study*. Journal of Prosthetic Dentistry, 113(5), 440-447.

5. Caglar, I., Ates, S. M., Yesil Duymus, Z., & Topcuoglu, S. (2018). *The effect of various polishing systems on surface roughness and phase transformation of monolithic zirconia*. The Journal of Advanced Prosthodontics, 10(2), 132-140.

6. Patil, N. A., Pedgaonkar, S., Dyawanapelly, S., & Joshi, R. (2022). *Wear and 3D Micro-Morphological Studies on CAD/CAM Milled Dental Zirconia for Post-Fabrication Dental Processes*. Key Engineering Materials, 913, 3-16.

7. Bartolo, D., Cassar, G., Camilleri, L., Valdramidis, V., Buhagiar, J., & Camilleri, J. (2017). *Effect of polishing procedures and hydrothermal aging on wear characteristics and phase transformation of zirconium dioxide*. Journal of Prosthetic Dentistry, 117(1), 545-551.

8. Fook, A. C. B. M., Azarhoushang, B., & Zahedi, A. (2019). *Characterization of Zirconia-Based Ceramics After Microgrinding.* Journal of Micro and Nano-Manufacturing, 7(3), 031003.

9. Tao, Y., Guo, X., Fang, Y., Zhou, T., Xie, H., Bao, C., & Shao, L. (2020). *The application potential of self-glazed zirconia crowns confirmed by easy grinding and polishing of the enamel-like surface*. Advances in Applied Ceramics, 119(3), 147-154.

10. Han, X., Gan, L., Hua, C., Chen, J., & Zhou, K. (2023). *Research on Chemical Mechanical Polishing Technology for Zirconium-Based Amorphous Alloys*. Micromachines, 14(3), 584.

11. Gupta, S., Gupta, H., & Tandan, A. (2021). *Impact of Different Surface Treatments on Flexural Strength and Surface Roughness of Zirconia Implant Material: An In Vitro study*. World Journal of Dentistry, 12(1), 38-43.

12. Mohammadi-Bassir, M., Jamshidian, M., Rezvani, M. B., & Alizadeh-Oskoee, P. (2017). *Effect of coarse grinding, overglazing, and 2 polishing systems on the flexural strength, surface roughness, and phase transformation of yttrium-stabilized tetragonal zirconia*. Journal of Prosthetic Dentistry, 118(5), 658-665.

13. Lee, K. R., Choe, H. C., & Heo, Y. R. (2019). *The effects of surface grinding and polishing on the phase transformation and flexural strength of zirconia*. The Journal of Advanced Prosthodontics, 11(1), 1-8.

14. Gaonkar, S., Aras, M. A., & Chitre, V. (2020). *An in vitro study to compare the surface roughness of glazed and chairside polished dental monolithic zirconia using two polishing systems*. The Journal of Indian Prosthodontic Society, 20(2), 190-196.

15. Zucuni, C. P., Guilardi, L. F., Rippe, M. P., Pereira, G. K. R., Valandro, L. F., & Bottino, M. A. (2019). *Effect of finishing/polishing on the fatigue strength, surface topography, and roughness of an yttrium-stabilized tetragonal zirconia polycrystals subjected to grinding*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 93, 222-229.

16. Kozmacs, C., Hollósi, P., Borbély, J., & Hermann, P. (2017). *Polishing of Monolithic Zirconia Crowns-Results of Different Dental Practitioner Groups*. Dentistry Journal, 5(4), 30.

17. Lei, X., Wang, X., Zhao, B., & Xie, J. (2014). *Surface Roughness Prediction and Experimental Analysis in Grinding the Material of Zirconia Used by Dental Restoration*. Materials Science Forum, 800-801, 160-164.

18. Fook, A. C. B. M., Azarhoushang, B., & Zahedi, A. (2019). *Structuring of Bioceramics by Micro-Grinding for Dental Implant Applications.* Micromachines, 10(5), 312.

19. Chen, Y., Liang, S., Jiang, N., Liu, W., Li, T., & Xie, Q. (2022). *Effects of Different Polishing Systems on Surface Roughness and Crystal Structure of Zirconia.* Applied Bionics and Biomechanics, 2022, 5360893.

20. Wajih, A. M., Salloomi, K. N., & Al-Naimi, R. J. (2014). *Effect of different polishing systems on the surface roughness of full-contour zirconia.* Journal of Baghdad College of Dentistry, 26(4), 78-84.

21. Lee, M. H., Son, J. S., Oh, S., & Kim, K. M. (2019). *Effects of different surface finishing protocols for zirconia on surface roughness and bacterial biofilm formation*. The Journal of Advanced Prosthodontics, 11(1), 41-47.

22. Dejkun, K., Zlamal, T., Hlavac, L. M., & Foldyna, J. (2018). *Globale Oberflächenoptimierung Beim Fräsen / Global Optimization of Surface Quality for Milling Processes*. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 113(7-8), 17-21.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ СПОЙЛЕРІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Погурало А., Посонський С.
Хмельницький національний університет, Україна

Анотація

У роботі розглянуто основні технологічні процеси виготовлення автомобільних спойлерів із композиційних матеріалів, зокрема методи ручного формування, розпилення та особливості вибору матеріалів. Проаналізовано вплив типу армувальних волокон і полімерних матриць на експлуатаційні характеристики виробів. Окрему увагу приділено економічним аспектам виробництва, включаючи фактори формування собівартості та ефективність різних технологій. Визначено переваги та обмеження застосування термореактивних і термопластичних полімерів у виробництві композитних конструкцій. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів виготовлення аеродинамічних елементів автомобілів.

Ключові слова

Композитні матеріали, автомобільний спойлер, епоксидні смоли, поліефірні смоли, армувальні волокна, ручне формування, метод розпилення, собівартість.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF MANUFACTURING AUTOMOTIVE SPOILERS FROM COMPOSITE MATERIALS

Poguralo A., Posonskiy S.
Khmelnytskyi National University, Ukraine

Abstract

The paper examines the main technological processes used in the production of automotive spoilers made of composite materials, including hand lay-up and spray-up methods, as well as material selection features. The influence of reinforcing fibers and polymer matrices on the performance characteristics of products is analyzed. Particular attention is paid to economic aspects of production, including cost formation factors and efficiency of different technologies. Advantages and limitations of thermosetting and thermoplastic polymers in composite manufacturing are identified. The obtained results can be used to optimize technological processes in the production of automotive aerodynamic components.

Keywords

Composite materials, automotive spoiler, epoxy resins, polyester resins, reinforcing fibers, hand lay-up, spray-up method, production cost.

Вступ

Сучасна автомобільна промисловість активно використовує композиційні матеріали для виготовлення аеродинамічних елементів кузова, зокрема спойлерів. Це зумовлено їх високими питомими міцнісними характеристиками, малою масою та можливістю формування складних геометричних форм [1, 2]. Водночас важливим є вибір оптимальної технології виробництва, яка забезпечує баланс між якістю виробу та його собівартістю.

Зростання попиту на доступні та ефективні аеродинамічні компоненти стимулює удосконалення технологічних процесів, а також застосування різних типів полімерних матриць і армувальних матеріалів [3].

Об’єкт та методи дослідження

Об’єктом дослідження є процеси виготовлення автомобільних спойлерів із композиційних матеріалів.

Методи дослідження включають:

1) аналіз технологічних процесів формування композитів;

2) порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей матеріалів;

3) оцінювання економічних показників виробництва;

4) узагальнення літературних джерел щодо сучасних методів виготовлення композитних конструкцій.

Постановка завдання

Основним завданням дослідження є:

1) аналіз сучасних технологій виготовлення автомобільних спойлерів;

2) визначення впливу типу матеріалів на властивості виробів;

3) оцінка економічної доцільності використання різних методів формування;

4) виявлення оптимальних поєднань матеріалів і технологій для підвищення ефективності виробництва.

Результати та їх обговорення

1. Аналіз властивостей армувальних матеріалів.

Армувальні волокна є визначальним компонентом композитних матеріалів, оскільки саме вони формують основні механічні характеристики виробу. Встановлено, що вибір типу волокна безпосередньо впливає на жорсткість, міцність, ударну в'язкість та довговічність автомобільного спойлера [1, 4].

Скловолокно типу E-glass є найбільш економічно доступним і технологічним матеріалом. Воно забезпечує достатній рівень міцності при відносно низькій вартості, що робить його доцільним для серійного виробництва. Водночас його модуль пружності поступається іншим типам волокон, таблиця 1. [1].

S-glass характеризується підвищеною міцністю та жорсткістю, що дозволяє використовувати його у конструкціях, які піддаються значним механічним навантаженням. Однак його вартість є вищою, що обмежує застосування у масовому виробництві.

Арамідні волокна (кевлар) відзначаються високою ударною міцністю та стійкістю до руйнування, що є важливим для елементів, які можуть зазнавати локальних ударів або вібрацій. Проте вони мають нижчу жорсткість і складніші в обробці, що ускладнює технологічний процес [2].

Таким чином, вибір армувального матеріалу повинен базуватися на компромісі між механічними вимогами, вартістю та технологічністю виготовлення [4].

Таблиця 1. Властивості композитних армуючих волокон.

Матеріал	Модуль міцності на розтяг (E) (ГПа)	Міцність на розрив (δ) (ГПа)	Подовження (є) (%)	Щільність (ρ) (мг/м^3)	Питомий модуль (E/ρ) (мг/кг)
E-glass	72,4	2,4	2,6	2,54	28,5
S-glass	85,5	4,5	2,0	2,49	34,3
кевлар	124	3,6	2,3	1,45	86

2. Вплив типу полімерної матриці на властивості композиту.

Полімерна матриця визначає не лише технологічні параметри виготовлення, але й експлуатаційні характеристики готового виробу [5].

Епоксидні смоли забезпечують найвищі показники адгезії до волокон, що сприяє ефективній передачі навантаження. Вони мають високі механічні характеристики, низьку усадку та добру хімічну стійкість. Проте їх основними недоліками є висока вартість і відносно тривалий час тверднення [2].

Поліефірні смоли є найбільш поширеними завдяки низькій вартості та простоті застосування. Вони мають достатні механічні властивості для більшості автомобільних застосувань, але поступаються епоксидним за міцністю та довговічністю. Крім того, вони

характеризуються вищою усадкою та нижчою стійкістю до впливу навколишнього середовища.

Вінілоефірні смоли займають проміжне положення. Вони поєднують кращу міцність і хімічну стійкість, ніж поліефіри, при нижчій вартості порівняно з епоксидними системами. Це робить їх перспективними для використання у відповідальних елементах середнього цінового сегмента [5].

Отже, вибір матриці визначається вимогами до міцності, температурної стійкості, вартості та умов експлуатації.

3. Порівняльний аналіз технологічних методів формування.

Метод ручного укладання, рис. 1. Результати аналізу показують, що цей метод забезпечує високу гнучкість у виборі структури армування та дозволяє виготовляти вироби складної форми. Основною перевагою є низький рівень капітальних витрат на обладнання [2].

Рис. 1. Метод ручного укладання.

Однак встановлено такі недоліки: значна залежність якості від людського фактора; нерівномірність товщини та структури ламінату; обмежена повторюваність характеристик виробів; висока трудомісткість процесу.

Це обмежує застосування методу переважно дрібносерійним виробництвом або виготовленням прототипів.

Метод розпилення, рис. 2. Метод розпилення забезпечує значно вищу продуктивність завдяки автоматизації процесу нанесення матеріалу. Він дозволяє скоротити тривалість виробничого циклу та зменшити трудові витрати.

Разом із тим виявлено ряд обмежень: складність контролю товщини шару; менша однорідність структури композиту; обмежене використання для високонавантажених конструкцій; підвищене утворення відходів матеріалу [2].

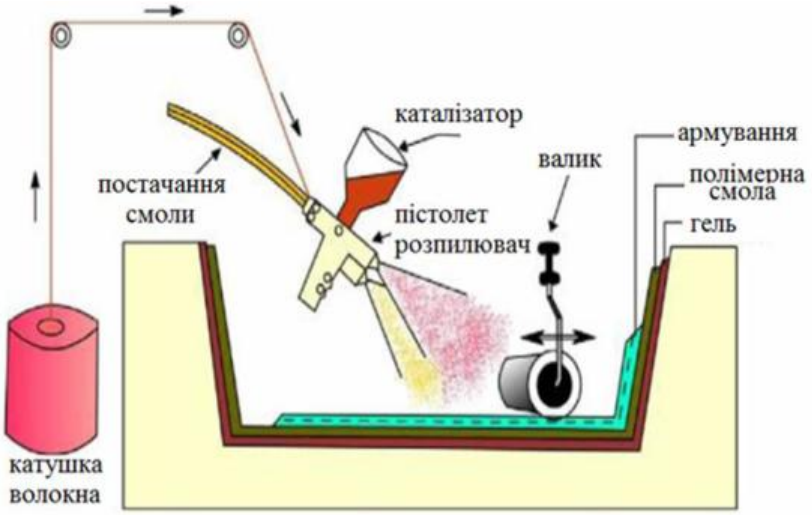


Рис. 1. Метод розпилення.

Цей метод є ефективним для виготовлення виробів середньої складності з помірними вимогами до механічних характеристик.

4. Вплив технологічних параметрів на якість виробу.

Якість композитного спойлера значною мірою залежить від таких параметрів [1, 4]:

- ступінь просочення армувального матеріалу;
- наявність повітряних включень;
- температура та тривалість полімеризації;
- правильність укладання шарів.

Недостатнє видалення повітря призводить до утворення пор, що знижує міцність і довговічність виробу. Нерівномірне просочення може викликати локальні концентрації напружень.

Контроль температурного режиму є критичним, оскільки надмірне тепловиділення при полімеризації може спричинити внутрішні дефекти та деформації.

5. Економічна ефективність різних підходів.

Проведений аналіз показує, що економічна ефективність виробництва залежить від масштабу випуску [3]:

- при малосерійному виробництві доцільним є метод ручного формування через низькі інвестиційні витрати;
- при середньосерійному виробництві ефективним є метод розпилення;
- для масового виробництва доцільно застосовувати більш автоматизовані технології (наприклад, вакуумне формування або інжекційні методи).

Вартість матеріалів становить значну частку собівартості, тому оптимізація складу композиту є одним із ключових напрямів зниження витрат.

Висновки

1. Композитні матеріали є ефективним рішенням для виготовлення автомобільних спойлерів завдяки високим механічним характеристикам і малій масі.
2. Вибір матеріалу та технології виробництва суттєво впливає на експлуатаційні властивості та собівартість виробу.
3. Метод ручного формування доцільний для дрібносерійного виробництва, тоді як метод розпилення забезпечує вищу продуктивність.
4. Епоксидні, поліефірні та вінілоефірні смоли мають різні переваги, що дозволяє обирати оптимальний варіант залежно від умов експлуатації.
5. Оптимізація технологічних процесів є ключовим чинником підвищення конкурентоспроможності продукції.

Література

1. Mallick P. K. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 538 p.
2. Campbell F. C. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2020. 704 p.
3. Strong A. B. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*. 3rd ed. Dearborn: SME, 2018. 600 p.
4. Hull D., Clyne T. W. *An Introduction to Composite Materials*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. 344 p.
5. Gibson R. F. *Principles of Composite Material Mechanics*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 716 p.

ДИНАМІЧНІ ЗУСИЛЛЯ В НЕСУЧОМУ КАНАТІ З ПРУЖНО ПОДАТЛИВИМИ ОПОРАМИ НА РІЗНИХ РІВНЯХ ПРИ РАПТОВОМУ ОБРИВІ СТРОПИ ТА ВІДРИВІ ПРИМЕРЗЛОГО ВАНТАЖУ

Слєпко Т.[1], Диха О.[1], Каплун П.[1], Драч І.[1]
[1]Хмельницький національний університет, Україна

Анотація

Досліджено динамічні зусилля в несучому канаті тимчасової підвісної установки з пружно податливими опорами, розташованими на різних рівнях. Проаналізовано характерні режими роботи системи: обрив строп, відрив примерзлого вантажу, стопоріння та падіння вантажу на канат. Запропоновано математичну модель, що враховує жорсткість канату, масу системи та геометричні параметри, і базується на диференціальному рівнянні його коливань із відповідними початковими умовами. Отримано аналітичні залежності для визначення максимальних прогинів, прискорень і натягу канату, а також встановлено зв'язок між динамічними навантаженнями та параметрами системи. Показано, що в окремих режимах динамічні зусилля суттєво перевищують статичні. Результати можуть бути використані для підвищення точності проєктування та забезпечення безпеки канатних систем.

Ключові слова

Тимчасова система канатного підйому, несучий канат, динамічне навантаження, поперечні коливання, аналітична модель, обрив стропи, відрив вантажу, натяг каната, коливання в тросових системах.

DYNAMIC FORCES IN A LOAD-BEARING ROPE ELASTICALLY COMPLIANT SUPPORTS AT DIFFERENT LEVELS UNDER SUDDEN CHOKER BREAKAGE AND THE FROZEN LOAD DETACHMENT

Sliepko T.[1], Dykha O.[1], Kaplun P.[1], Drach I.[1]
[1] Khmelnytskyi National University, Ukraine

Abstract

Dynamic forces in the carrying rope of a temporary suspended system with elastically compliant supports located at different levels are investigated. The characteristic operating modes of the system are analyzed, including choker breakage, detachment of a frozen load, load arrest, and load impact on the rope. A mathematical model is proposed that takes into account rope stiffness, system mass, and geometric parameters, and is based on the differential equation of its vibrations with corresponding initial conditions. Analytical relationships are obtained for determining maximum deflections, accelerations, and rope tension, and the relationship between dynamic loads and system parameters is established. It is shown that in certain operating modes, dynamic forces significantly exceed static ones. The results can be used to improve design accuracy and ensure the safety of cable systems.

Keywords

Temporary rope hoisting system, carrying rope, dynamic loading, transverse vibrations, analytical model, choker breakage, load detachment, rope tension, oscillations in cable systems.

Вступ

Тимчасові підвісні канатні установки (ТПКУ) широко застосовуються у будівництві, монтажі обладнання, гірничих і лісозаготівельних роботах, особливо в умовах обмеженого доступу. Основним елементом таких систем є несучий канат, який передає навантаження від вантажу до опор і визначає ефективність роботи установки. На її функціонування суттєво впливають механічні властивості каната, умови закріплення, геометрія прольоту та характер навантаження.

У процесі експлуатації можливі режими різкої зміни навантаження, що спричиняє складні динамічні процеси, що супроводжуються зростанням натягу, пружними деформаціями, коливаннями та хвильовим перенесенням енергії.

Задача ускладнюється за наявності пружно податливих опор, розташованих на різних рівнях, що змінює як довжину каната, так і умови поширення напружень. У цьому випадку систему доцільно розглядати як пружну нитку зі змінними граничними умовами. Існуючі підходи [1–8], зокрема на основі теорії коливань, хвильових моделей і методу

скінченних елементів, не забезпечують достатньо точних аналітичних залежностей для оцінки динамічного натягу в таких умовах, що зумовлює необхідність подальших досліджень.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На підвісних канатних установках використовують опори зі значною податливістю, яка визначає статичні і динамічні зусилля у канатній оснастці.

Розглянуто [9] вільні коливання жорстко закріпленого на кінцях несучого канату установки з одним прольотом з пружно податливими опорами, розташованими на різній висоті. Одержано рівняння вільних поперечних коливань канату з урахуванням модуля осьового стискання та напружень стандартної пенетрації.

Мета та задачі дослідження

Стаття спрямована на розроблення уточненої аналітичної моделі, яка враховує вплив геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей системи на динамічні характеристики несучого канату. Побудовано спрощену, але фізично обґрунтовану аналітичну модель для оцінювання динамічних зусиль у несучому канаті тимчасової підвісної установки з опорами, розташованими на різних висотних рівнях. Оцінено режими роботи ТПКУ за обриву стропи; відриву примерзлого вантажу; стопоріння вантажу; ударного навантаження каната внаслідок падіння вантажу.

Математична модель поперечних коливань несучого каната з пружно податливими опорами на різних вертикальних рівнях

Нехай основній формі поперечних коливань несучого каната відповідає пружна лінія статичного його прогину під дією власної ваги, розподіленої по хорді прогину, та зосередженої сили P (рис. 1). Оскільки в практичних розрахунках коливань каната враховуються максимальні зусилля, то сили опору та внутрішнього тертя в моделі не розглядаємо.

Згідно зі схемою прогинів несучого канату з пружно податливими опорами на різних рівнях (рис. 1), вільні поперечні коливання каната з жорстко закріпленими кінцями описують диференціальним рівнянням:

$$\ddot{y} + k^2 y = c - \mu \cdot \left(3f \cdot y^2 + y^3\right), \tag{1}$$

де $y(t)$ – приріст вертикального прогину несучого каната в середині прольоту під дією динамічного навантаження; $k^2 = 4 \cdot \cos^3\beta \cdot \dfrac{T + 4A_{gen}\left(\dfrac{f_0}{l}\right)^2 \cdot \cos^3\beta}{M \cdot l}$; $\mu = \dfrac{8A_{gen} \cdot \cos^6\beta}{M \cdot l^3}$; $c = g \cdot \left(1 + \cos^3\beta\right)$; f – максимальний прогин каната під статичним навантаженням:

$$f = \frac{Q \cdot l}{4T \cdot \cos\beta}.$$

Тут T – натяг канта; l – довжина його прольоту; Q – еквівалентне зосереджене навантаження в середині прольоту; β – кут нахилу лінії прольоту каната до горизонту; A_{gen} – зведена повздовжня жорсткість канатної системи з урахуванням податливості опор; M – еквівалентна (приведена) маса системи «канат–вантаж»:

$$M = m + m_1 + \frac{\rho}{\cos\beta} \cdot k_\rho;$$

де m – маса вантажу; m_1 – маса вантажного візка; ρ – лінійна маса каната; k_ρ – коефіцієнт зведення лінійної маси каната до еквівалентної зосередженої:

$$k_\rho = \frac{1}{3}\left(1 + \xi + 0{,}4\xi^2\right),$$

$$\xi = \frac{q \cdot l}{\left(4\left(P + G + \frac{q \cdot l}{2 \cdot \cos\beta}\right) + 2H \cdot tg\beta\right) \cdot \cos\beta}.$$

Тут P і G – вага вантажу та візка; вага вантажного візка; q– лінійне навантаження від власної ваги каната; H – горизонтальна компонента натягу несучого канату.

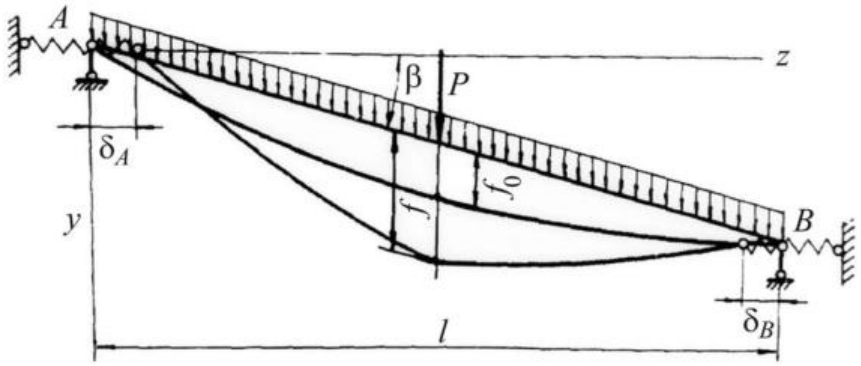


Рис. 1. Схема деформацій несучого канату, жорстко закріпленого в пружно податливих опорах на різних вертикальних рівнях за обриву строп.

Параметр μ вважатимемо малим, що відповідає співвідношенням, характерним для досліджуваних ТПКУ. Початкові та граничні умови для задачі (1) визначає характер режимів роботи установки, зокрема, раптовий обрив стропи; відрив вантажу, що примерз до основи; фіксація (стопоріння) вантажу, а також ударне навантаження на канат, спричинене падінням вантажу.

Розв'язок рівняння (1) шукатимемо у вигляді рядів за степенями малого параметра μ:

$$y = \sum_{n=0}^{\infty} \mu^n y_n(t) = y_0 + \mu \cdot y_1(t) + \ldots, \tag{2}$$

$$p^2 = k^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \mu^n p_n = k^2 + \mu \cdot p_1 + \ldots, \tag{3}$$

де p – шукана частота.

Обмежимось знаходженням лише виписаних членів розкладу.

Підставимо вирази (2) і (3) у рівняння (1), отримаємо систему рівнянь (4) для послідовного знаходження початкового та першого наближень до розв'язку задачі:

$$\begin{aligned} &\ddot{y}_0 + p^2 y_0 = c; \\ &\ddot{y}_1 + p^2 y_1 = p_1 y_0 - y_0^2(3f + y_0). \end{aligned} \tag{4}$$

Отримали систему рівнянь (4) для визначення функцій y_0, y_1 та сталої p_1.

Результати моделювання динамічних зусиль у несучому канаті за миттєвої зміни технологічного навантаження

Характерними для динамічного навантаження несучих канатів підвісних установок є обрив стропи за максимального натягу тягово-підіймального канату, відрив примерзлого вантажу від ґрунту, стопоріння вантажу, удар під час падіння вантажу на канат.

Максимальні динамічні зусилля в несучому канаті при раптовому обриві стропи та відриві примерзлого вантажу

Після обриву строп або відриву примерзлого вантажу від ґрунту несучий канат разом із вантажним візком і вантажем (у другому випадку) переходить у режим вільних коливань, який описує рівняння (1) з початковими умовами

$$y(0)=y^*; \qquad \dot{y}(0)=0,$$

де y^* – прогин каната в момент обриву стропи або відриву примерзлого вантажу від ґрунту (рис. 1).

Початкові умови вважатимуться виконані, якщо

$$y_0(0)=y^*;\ y_1(0)=0;\quad \dot{y}_0(0)=\dot{y}_1(0)=0. \tag{5}$$

Розв'язок першого рівняння системи (4) шукаємо у вигляді

$$y_0(t)=A_0\cdot\cos pt+B_0\cdot\sin pt+C, \tag{6}$$

де $C=\dfrac{c}{p^2}$, а сталі $A_0=y^*$ і $B_0=0$ знаходимо з початкових умов (5).

Тоді

$$y_0(t)=y^*\cdot\cos pt+C. \tag{7}$$

Підставимо вираз (7) в друге рівняння системи (4). Враховуючи, що $\cos^3 pt=\dfrac{1}{4}(\cos 3pt+3\cos pt);\ \cos^2 pt=\dfrac{1}{2}(1+\cos 2pt)$, одержимо:

$$\begin{aligned}\ddot{y}_1+p^2y_1=&\left[p_1-\left(6f\cdot c+3c^2+\frac{3}{4}y^{*2}\right)\right]\cdot\left(y^*\cdot\cos pt+C\right)-\\&-\frac{3}{4}(2f+C)y^{*2}+C^2\cdot(3f+2C)-\\&-\frac{3}{2}y^{*2}(f+C)\cdot\cos 2pt-\frac{1}{4}y^{*3}\cdot\cos 3pt.\end{aligned} \tag{8}$$

Щоб уникнути появи часових складників рівняння (8), обираємо $p_1=6f\cdot c+3c^2+\dfrac{3}{4}y^{*2}=0$. Тоді воно набуває вигляду

$$\ddot{y}_1+p^2y_1=-\frac{3}{4}(2f+C)y^{*2}+C^2\cdot(3f+2C)-\frac{3}{2}y^{*2}(f+C)\cdot\cos 2pt-\frac{1}{4}y^{*3}\cdot\cos 3pt. \tag{9}$$

Розв'язок рівняння (9) такий:

$$\begin{aligned}y_1(t)=&A_1\cdot\cos pt+B_1\cdot\sin pt+\left(\frac{-\frac{3}{4}(2f+C)y^{*2}+C^2\cdot(3f+2C)}{p^2}\right)^2+\\&+\frac{y^{*3}}{32p^2}\cos 3pt+\frac{1}{2}f\left(\frac{y^*}{p}\right)^2\cos 2pt.\end{aligned} \tag{10}$$

З початкових умов одержимо $A_1=-\dfrac{1}{2}f\cdot\left(\dfrac{y^*}{p}\right)^2-\dfrac{y^{*3}}{32p^2};\ B_1=0$ і звідти рівняння (10) набуде вигляду

$$\begin{aligned}y_1(t)=&\frac{-\frac{3}{4}(2f+C)y^{*2}+C^2\cdot(3f+2C)}{p^2}(1-\cos pt)+\\&+\frac{1}{2}\left(\frac{y^*}{p}\right)^2\cdot\left(f(\cos 2pt-\cos pt)+\frac{y^{*3}}{32p^2}(\cos 3pt-\cos pt)\right).\end{aligned} \tag{11}$$

Рівняння для динамічних переміщень у першому наближенні буде:

$$y(t)=y^{*}\cdot\cos pt+C+\frac{\mu}{p^{2}}\cdot\left[\frac{-\frac{3}{4}(2f+C)\cdot y^{*2}+C^{2}\cdot(3f+2C)}{p}(1-\cos pt)+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{2}y^{*2}\cdot f\cdot(\cos 2pt-\cos pt)+\frac{1}{32}y^{*3}(\cos 3pt-\cos pt)\right], \tag{12}$$

$$p^{2}=k^{2}+\mu\cdot\left(6f\cdot c+3c^{2}+\frac{3}{4}y^{*2}\right). \tag{13}$$

Прискорення руху зведеної маси в першому наближенні:

$$\ddot{y}=-p^{2}y^{*}\cdot\cos pt+\mu\cdot\left[\left(-\frac{3}{4}(2f+C)y^{*2}+C^{2}\cdot(3f+2C)\right)\cdot\cos pt-\right.$$
$$\left.-\frac{1}{2}\cdot y^{*2}\cdot f(4\cos 2pt-\cos pt)-\frac{1}{32}\cdot y^{*3}\cdot(9\cos 3pt-\cos pt)\right]. \tag{14}$$

Максимальне прискорення руху одержимо з виразу (14) за умови $pt=\pi$ з урахуванням співвідношення (13):

$$\ddot{y}_{\max}=-k^{2}y^{*}-\mu\cdot\left(3f\cdot y^{*2}+\frac{1}{4}y^{*3}+\frac{3}{4}c\cdot y^{*2}-2c^{3}-3f\cdot c^{2}\right). \tag{15}$$

Якщо $P_{\partial}>P$, де P – сила, яка викликає прогин y^{*}, динамічний натяг канату перевищуватиме статичний і дорівнюватиме:

$$T_{\partial}=\frac{M\cdot(g+\ddot{y})}{4\left(f+y_{\partial}^{*}\right)}\cdot\frac{l}{\cos\beta}. \tag{16}$$

Коефіцієнт динамічності натягу в несучому канаті

$$k_{\partial}=\frac{T_{\partial}}{T}, \tag{17}$$

де T – максимальний натяг канату за статичного навантаження, тобто під час піднімання вантажу вагою P.

Натяг канату під дією сили ваги вантажу P визначимо з рівняння загального стану каната [9]:

$$T^{3}-T^{2}\cdot\left[T_{0}-\frac{A_{gen}}{2T_{0}^{2}}\left(\frac{q^{2}\cdot l^{2}}{12}+G\cdot\left(G+\frac{q\cdot l}{2\cos\beta}\right)\cdot\left(1-\frac{a}{l}\right)\frac{a}{l}\cos^{2}\beta\right)-\right.$$
$$\left.-\frac{A_{gen}}{8}\left(\frac{q^{2}\cdot l^{2}}{3}+(P+G)\cdot\left(P+G+\frac{q\cdot l}{2\cos\beta}\right)\right)\right]\cdot\cos^{2}\beta=0, \tag{18}$$

де T_0 – монтажний натяг несучого каната; a – відстань по горизонталі від опори до вантажного візка.

За обриву строп приріст прогину несучого каната під дією вантажу вагою P:

$$y^{1*}=f-f_{0}, \tag{19}$$

де f_0 – максимальний прогин каната під дією власної ваги і ваги вантажного візка

$$f_{0}=\frac{\left(G+\frac{q\cdot l}{2\cos\beta}\right)\cdot l}{4T_{0}\cdot\cos\beta}, \tag{20}$$

Тут f – максимальний прогин каната під дією власної ваги, ваги вантажного візка і сили P (рис.1):

$$f = \frac{\left(P + G + \frac{q \cdot l}{2\cos\beta}\right) \cdot l}{4T \cdot \cos\beta}, \tag{21}$$

З урахуванням виразів (19), (20), (21) одержимо

$$y^{1^*} = \left(\frac{P + G + \frac{q \cdot l}{2\cos\beta}}{T} - \frac{G + \frac{q \cdot l}{2\cos\beta}}{T_0} \right) \cdot \frac{l}{4\cos\beta}. \tag{22}$$

Зведена маса канатної системи після обриву строп (m =0)

$$M^1 = m_1 + \frac{\rho}{\cos\beta} \cdot k_\rho, \tag{23}$$

тоді

$$\xi^1 = \frac{q \cdot l}{\left(4\left(G + \frac{q \cdot l}{2 \cdot \cos\beta}\right) + 2H_0 \cdot tg\beta\right) \cdot \cos\beta},$$

де H_0 – горизонтальна компонента монтажного натягу несучого каната.

Його динамічний натяг знайдемо з виразу (16):

$$T_д^1 = \frac{M \cdot \left(g + \ddot{y}(t)\right)}{4\left(f + y^{1^*}\right)} \cdot \frac{l}{\cos\beta}.$$

За відриву примерзлого вантажу від ґрунту (рис.2) приріст прогину несучого каната під дією сили примерзання (сили зчеплення вантажу і ґрунту) S

$$y^{2^*} = y_{\max} = f_1 - f_0, \tag{24}$$

де f_1 – максимальний прогин каната під дією власної ваги, ваги вантажного візка, ваги вантажу P і сили S:

$$f_1 = \frac{\left(S + P + G + \frac{q \cdot l}{2\cos\beta}\right) \cdot l}{4T_1 \cdot \cos\beta}, \tag{25}$$

де T_1 – максимальний статичний натяг несучого каната за відриву примерзлого вантажу від ґрунту (рис.2).

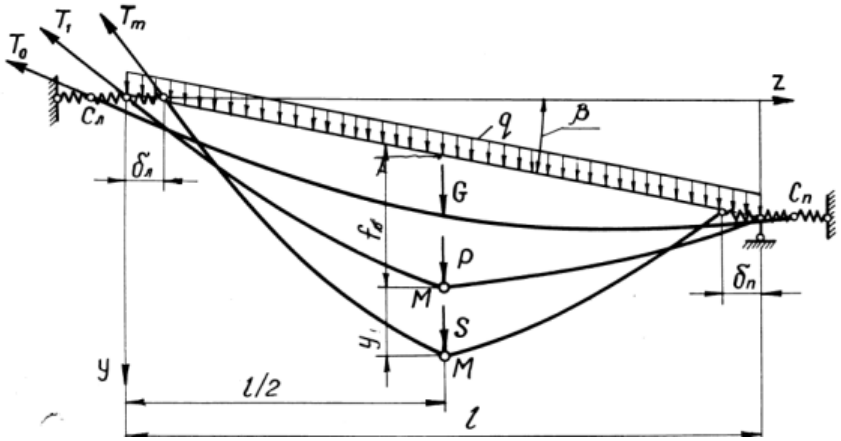


Рис. 2. Схема роботи несучого каната з пружно податливими опорами на різних вертикальних рівнях за відриву примерзлого вантажу від ґрунту.

З урахуванням виразів (24), (25), (21) одержимо:

$$y^{2^*} = \left(\frac{S + P + G + \frac{q \cdot l}{2\cos\beta}}{T_1} - \frac{P + G + \frac{q \cdot l}{2\cos\beta}}{T} \right) \cdot \frac{l}{4\cos\beta}. \quad (26)$$

Максимальний натяг канату T_1 за відриву вантажу від ґрунту визначимо із рівняння (16):

$$T_1 = T_0 + (T - T_0)\left(1 + \frac{S}{P}\right). \quad (27)$$

Зведена маса канатної системи після відриву вантажу від ґрунту $M^2 = M = m + m_1 + \frac{\rho}{\cos\beta} \cdot k_\rho$, а динамічний натяг каната:

$$T_o^2 = \frac{S + P + G + \frac{q \cdot l}{2\cos\beta}}{4\left(f + y^{2^*}\right)} \cdot \frac{l}{\cos\beta}. \quad (28)$$

Коефіцієнт динамічності зусиль, які виникають у несучому канаті за відриву примерзлого вантажу від ґрунту, для максимального статичного натягу каната визначимо за формулою (17):

$$k_o^2 = \frac{M \cdot g}{S + P + G + \frac{q \cdot l}{2\cos\beta}} \left(1 + \frac{y_{\max}}{g}\right) \frac{1 + \frac{y^{2^*}}{f_1}}{1 + \frac{y_{\max}}{f_1}}. \quad (29)$$

З аналізу виразів (25), (21), (20) одержали нерівність, за виконання якої мінімальний натяг несучого каната під час поперечних коливаннях буде менший, ніж монтажний:

$$\frac{S + P + G + \frac{q \cdot l}{2\cos\beta}}{T_1} > \frac{P + G + \frac{q \cdot l}{2\cos\beta}}{T} - \frac{G + \frac{q \cdot l}{2\cos\beta}}{T_0}. \quad (30)$$

Характерними режимами динамічного навантаження несучих канатів підвісних установок є обрив стропи за максимального натягу тягово-підіймального каната, відрив примерзлого вантажу від ґрунту,

Висновки

Розроблено математичну модель динамічної поведінки несучого каната з опорами, розташованими на різних висотних рівнях, з урахуванням податливості опор, маси вантажу та геометричних параметрів системи. Проаналізовано характерні режими функціонування тимчасової підвісної канатної установки за миттєвої зміни технологічного навантаження: обриву строп та відриву примерзлого вантажу від ґрунту. Отримано вирази для оцінювання максимальних прогинів, прискорень і натягу канату. Встановлено, що динамічні навантаження можуть суттєво перевищувати статичні, що необхідно враховувати під час проєктування тимчасових підвісних систем.

Література

1. Ma, Y., Xiao, X. (2016). Dynamic analyses of hoisting ropes in a multi-rope friction mine hoist and determination of proper hoisting parameters. Journal of Vibroengineering, 18, 2801–2817.
2. Mologni, O., Marchi, L., Lyons, C., Grigolato, S., Cavalli, R., Röser, D. (2021). Skyline tensile forces in cable logging: Field observations vs. software calculations. Croatian Journal of Forest Engineering, 42, 227–238.

3. Bao, J., Zhang, P., Zhu, C. (2015). Dynamic analysis of flexible hoisting rope with time-varying length. International Applied Mechanics, 51, 128–141.
4. Van Horssen, W.T. (2003). On the influence of lateral vibrations of supports for an axially moving string. Journal of Sound and Vibration, 268, 323–330.
5. Kaczmarczyk, S., Ostachowicz, W. (2003). Transient vibration phenomena in deep mine hoisting cables. Part 1: Mathematical model. Journal of Sound and Vibration, 262, 219–244.
6. Pandolfi, L. (2013). Boundary controllability and source reconstruction in a viscoelastic string under external traction. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 407, 464–479.
7. Perkins, N.C., Mote, C.D. Jr. (1987). Three-dimensional vibration of travelling elastic cables. Journal of Sound and Vibration, 114, 325–340.
8. Zhu, W.D., Chen, Y. (2005). Forced response of translating media with variable length and tension: application to high-speed elevators. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 219, 35–53.
9. Karlun, P., Slepko, T. (2025). Free transverse vibrations of a carrying rope with elastic supports at different levels. Herald of Khmelnytskyi National University, Technical Sciences Series, 347, 548–553.

ВПЛИВ СКЛАДУ МАТЕРІАЛІВ ТА ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ В УМОВАХ ЗМІШАНОГО МАЩЕННЯ

Каплун П., Чебан М., Лісовий Я.
Хмельницький національний університет, Україна

Анотація

Досліджено вплив складу матеріалів та зміцнення поверхневих шарів на триботехнічні характеристики підшипників ковзання в умовах змішаного мащення, характерних для роботи двигунів внутрішнього згоряння із системами «start-stop». Встановлено, що в зазначених умовах відбувається частий перехід від гідродинамічного до граничного режиму мащення, що суттєво підвищує інтенсивність зношування та вимоги до матеріалів вузлів тертя. Як антифрикційний матеріал розглянуто бронзу БрОЦС5-5-5, а як матеріал зміцненого поверхневого шару – сталь 38Х2МЮА після азотування. На основі експериментальних даних базового дослідження та аналітичних залежностей для гідродинамічного підшипника виконано прогноз коефіцієнта тертя, втрати маси та параметрів мастильної плівки при навантаженнях 90 Н і 150 Н. Встановлено, що для бронзи БрОЦС5-5-5 коефіцієнт тертя становить $\mu \approx 0{,}028–0{,}033$, що забезпечує стабільну роботу в умовах змінних навантажень, тоді як для азотованої сталі 38Х2МЮА – $\mu \approx 0{,}026–0{,}036$ із тенденцією до зростання при підвищенні навантаження. Показано, що зростання навантаження призводить до зменшення мінімальної товщини мастильної плівки з 6,1 до 5,6 мкм, що відповідає переходу до більш інтенсивного змішаного режиму мащення. Визначено, що розрахункова швидкість обертання для забезпечення гідродинамічного режиму становить 0,1–0,25 об/с, однак у реальних умовах експлуатації підшипники переважно працюють у змішаному режимі. Отримані результати свідчать, що наявність антифрикційних властивостей матеріалу є визначальним фактором зниження тертя, тоді як підвищення твердості поверхневого шару забезпечує зменшення зношування, але не гарантує стабільно низького коефіцієнта тертя.

Ключові слова

Підшипники ковзання, триботехнічні характеристики, коефіцієнт тертя, зношування, мастильна плівка, азотування, бронза.

Abstract

The influence of material composition and surface layer strengthening on the tribological characteristics of sliding bearings under mixed lubrication conditions typical for internal combustion engines with start-stop systems is investigated. It is established that under such operating conditions, frequent transitions from hydrodynamic to boundary lubrication occur, significantly increasing wear intensity and material requirements for friction units. Bronze BrOCS5-5-5 is considered as an antifriction material, while nitrided 38Cr2MoAl steel is used as a material

for a strengthened surface layer. Based on experimental data from a reference study and analytical relationships for hydrodynamic bearings, a predictive assessment of the friction coefficient, mass loss, and lubrication film parameters at loads of 90 N and 150 N was performed. It is determined that for bronze BrOCS5-5-5 the friction coefficient is μ ≈ 0.028–0.033, ensuring stable performance under variable loading, whereas for nitrided 38Cr2MoAl steel μ ≈ 0.026–0.036 with a tendency to increase at higher loads. It is shown that increasing the load leads to a decrease in the minimum lubrication film thickness from 6.1 to 5.6 μm, corresponding to a transition toward more intensive mixed lubrication conditions. The calculated rotational speed required to achieve hydrodynamic lubrication is 0.1–0.25 rev/s; however, in real operating conditions, bearings predominantly function in the mixed lubrication regime. The obtained results demonstrate that the presence of antifriction properties in the material is a key factor in reducing friction, whereas an increase in surface hardness improves wear resistance but does not guarantee a consistently low friction coefficient.

Вступ

У сучасних двигунах внутрішнього згоряння, оснащених системами «start-stop», підшипники ковзання значну частину часу працюють у режимах граничного та змішаного мащення, що супроводжується підвищеним зношуванням та нестабільністю коефіцієнта тертя [1, 3]. У таких умовах ефективність роботи вузлів тертя визначається не лише властивостями мастильного матеріалу, але й складом і структурою матеріалів контактуючих поверхонь [1, 2].

Відомо, що антифрикційні матеріали забезпечують зниження тертя за рахунок наявності м’яких фаз і здатності до формування захисних плівок, тоді як зміцнені поверхневі шари характеризуються підвищеною зносостійкістю, але можуть не забезпечувати стабільного режиму тертя при недостатньому мащенні [2, 5]. При цьому залежності коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування від навантаження мають нелінійний характер, що пов’язано з переходами між режимами мащення та зміною механізмів зношування [3, 6].

У зв’язку з цим актуальним є порівняльний аналіз поведінки антифрикційних матеріалів і зміцнених поверхневих шарів у підшипниках ковзання в умовах змінних навантажень, характерних для реальних режимів експлуатації.

Об’єкт та методи дослідження

Об’єктом дослідження є триботехнічні характеристики підшипників ковзання, що працюють в умовах змішаного мащення.

У роботі розглянуто два підходи до підвищення їх довговічності: застосування антифрикційного матеріалу (бронза БрОЦС5-5-5) та використання зміцненого поверхневого шару (сталь 38Х2МЮА після азотування). Такий підхід відповідає сучасним напрямам розвитку трибології, спрямованим на оптимізацію складу матеріалів і структури поверхні [3, 4].

Унаслідок обертання вала (ω) формується гідродинамічний клин мастила, що створює зону підвищеного тиску та забезпечує розділення контактуючих поверхонь. Розподіл тиску по куту φ має нелінійний характер і визначає несучу здатність мастильного шару. Мінімальна товщина мастильної плівки h_0 є критичним параметром переходу до гідродинамічного режиму мащення і залежить від навантаження F, швидкості обертання та властивостей мастильного матеріалу.

Оцінювання триботехнічних характеристик виконано на основі узагальнення експериментальних даних та аналітичних залежностей для гідродинамічних підшипників ковзання [2, 4]. Проведено прогноз зміни коефіцієнта тертя, втрати маси та мінімальної товщини мастильної плівки при навантаженнях 90 Н і 150 Н.

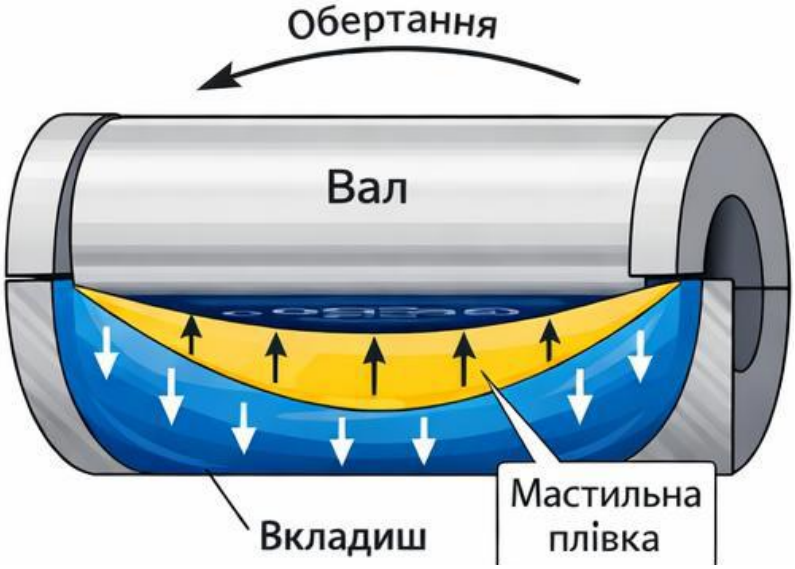


Рис. 1. Схема роботи гідродинамічного підшипника ковзання

Графічні залежності побудовано як прогнозні з урахуванням обмеженої кількості розрахункових точок, що дозволяє відобразити загальні тенденції зміни параметрів, характерні для переходу між режимами мащення [3, 6].

Постановка завдання

Метою роботи є прогнозна оцінка впливу складу матеріалів і зміцнення поверхневих шарів на триботехнічні характеристики підшипників ковзання. Для досягнення мети потрібно визначити зміну коефіцієнта тертя при навантаженнях 90 Н і 150 Н, оцінити втрату маси матеріалів, визначити мінімальну товщину мастильної плівки, встановити швидкість переходу до гідродинамічного режиму мащення.

Результати та їх обговорення

Результати прогнозної оцінки триботехнічних характеристик наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Прогнозні триботехнічні характеристики матеріалів

Матеріал	Навантаження, Н	μ	Втрата маси, г	h_0, мкм
БрОЦС5-5-5	90	0,028	0,0003	6,1
БрОЦС5-5-5	150	0,032	0,0008	5,6
38Х2МЮА (азот.)	90	0,026	0,0001	6,1
38Х2МЮА (азот.)	150	0,034	0,0012	5,6

Отримані результати показують, що антифрикційний матеріал забезпечує стабільні значення коефіцієнта тертя та менший знос у широкому діапазоні навантажень. Це пояснюється наявністю м’яких фаз, які зменшують адгезійну взаємодію поверхонь і сприяють формуванню захисної плівки.

У випадку сталі 38Х2МЮА після азотування спостерігається зниження втрати маси при малих навантаженнях, що пов’язано з високою твердістю поверхневого шару. Однак зі зростанням навантаження коефіцієнт тертя збільшується, що обумовлено відсутністю ефекту самозмащення.

Залежність коефіцієнта тертя від навантаження для досліджуваних матеріалів наведено на рис. 2. Як видно з графіка, для антифрикційного матеріалу БрОЦС5-5-5 спостерігається більш плавне зростання коефіцієнта тертя зі збільшенням навантаження,

тоді як для сталі 38Х2МЮА після азотування характерне більш інтенсивне зростання μ, що пов'язано з відсутністю ефекту самозмащення.

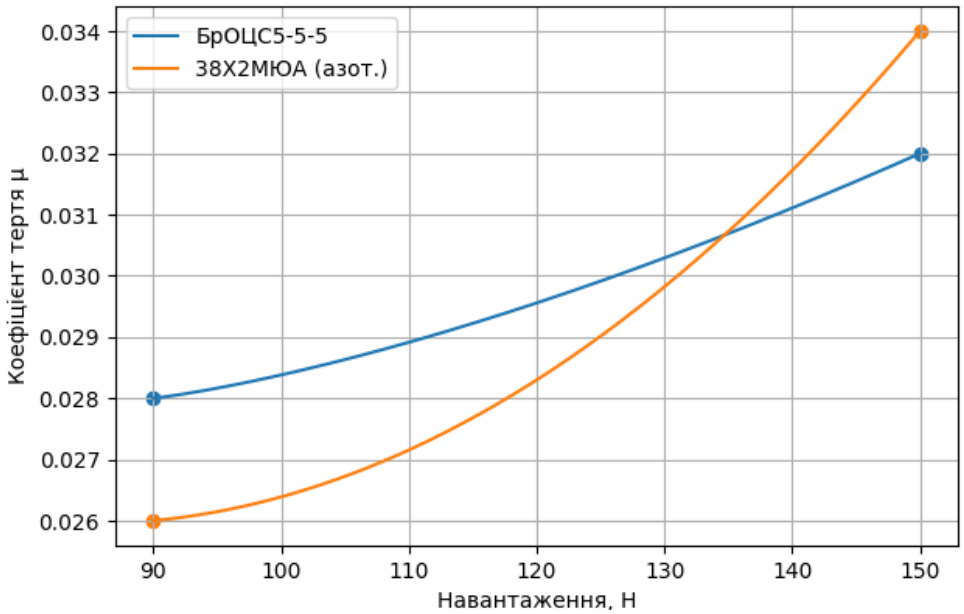


Рис. 2. Схематична прогнозна залежність коефіцієнта тертя від навантаження

Залежність втрати маси від навантаження наведено на рис. 3. Як видно з графіка, для антифрикційного матеріалу БрОЦС5-5-5 спостерігається відносно стабільне зростання зношування зі збільшенням навантаження. Для сталі 38Х2МЮА після азотування характерна менша втрата маси при навантаженні 90 Н, однак при 150 Н інтенсивність зношування суттєво зростає, що пов'язано з відсутністю самозмащення та переходом до більш жорстких умов тертя.

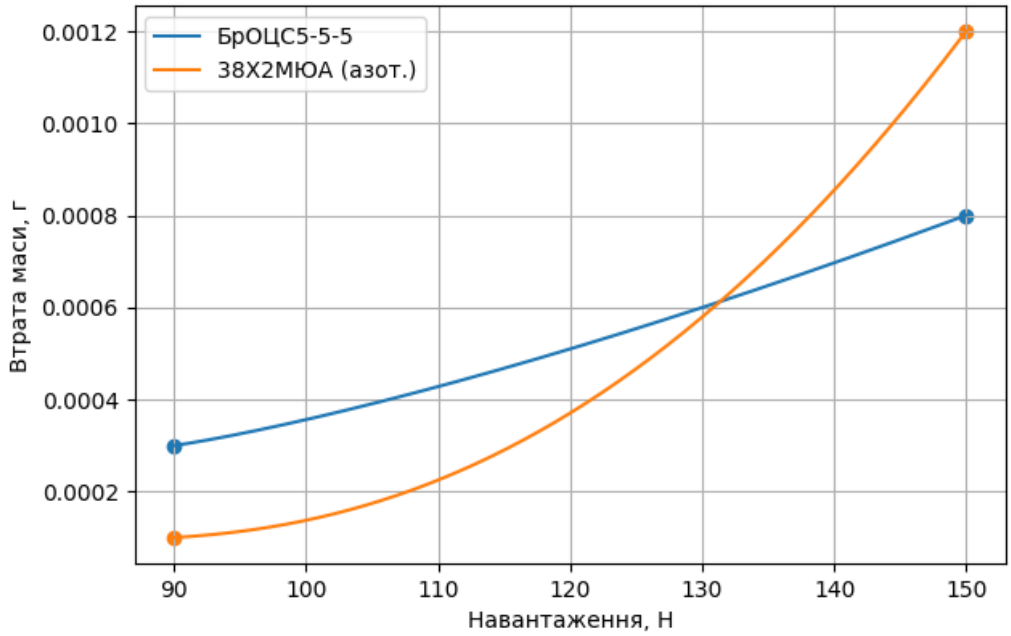


Рис. 3. Схематична прогнозна залежність втрати маси від навантаження

Перетин кривих на графіках залежності коефіцієнта тертя та втрати маси від навантаження (рис. 2, 3) свідчить про відмінний характер впливу навантаження на триботехнічні властивості досліджуваних матеріалів, а не про їх еквівалентність у певній точці. Для азотованої сталі 38Х2МЮА при навантаженні 90 Н спостерігається нижча втрата маси ($\Delta m \approx 0{,}0001$ г) та порівняно невисокий коефіцієнт тертя ($\mu \approx 0{,}026$), що обумовлено високою твердістю поверхневого шару та його здатністю ефективно

протидіяти початковим стадіям зношування. Однак зі збільшенням навантаження до 150 Н інтенсивність зношування та значення коефіцієнта тертя зростають більш різко ($\Delta m \approx 0{,}0012$ г, $\mu \approx 0{,}034$), що пояснюється відсутністю ефекту самозмащення та переходом до абразивного механізму руйнування внаслідок накопичення твердих частинок зношування в зоні контакту. Для антифрикційного матеріалу БрОЦС5-5-5 характерна більш стабільна поведінка: коефіцієнт тертя змінюється в межах $\mu \approx 0{,}028–0{,}032$, а втрата маси зростає від $\Delta m \approx 0{,}0003$ г до $\Delta m \approx 0{,}0008$ г зі збільшенням навантаження, що обумовлено наявністю м'яких структурних складових та здатністю матеріалу формувати захисну мастильну плівку. Таким чином, перетин кривих відображає зміну домінуючих механізмів тертя і зношування: у зоні малих навантажень визначальну роль відіграє твердість поверхні, тоді як при підвищенні навантаження перевагу отримують матеріали з вираженими антифрикційними властивостями, здатні забезпечувати стабільність параметрів тертя в умовах змішаного мащення. Це підтверджує доцільність диференційованого підходу до вибору матеріалів підшипників ковзання залежно від режимів їх роботи та рівня навантаження. Практично це означає, що антифрикційні матеріали доцільно застосовувати у вузлах із частими пусками, змінними режимами та підвищеним ризиком граничного тертя, тоді як зміцнені сталі – у вузлах із контрольованими умовами мащення, де пріоритетом є зносостійкість при відносно стабільних навантаженнях.

Аналіз параметрів мастильної плівки показує, що зі збільшенням навантаження її товщина зменшується приблизно на 8–10 %, що відповідає переходу до більш інтенсивного змішаного режиму мащення.

Розрахункова швидкість формування гідродинамічного режиму становить 0,1–0,25 об/с, однак у реальних умовах експлуатації підшипники працюють переважно у змішаному режимі.

Висновки

У результаті виконаного дослідження встановлено, що триботехнічні характеристики підшипників ковзання в умовах змішаного мащення визначаються не лише рівнем твердості матеріалу, але передусім його здатністю забезпечувати стабільні умови тертя за рахунок формування ефективної мастильної плівки.

Показано, що антифрикційний матеріал БрОЦС5-5-5 забезпечує більш стабільні значення коефіцієнта тертя ($\mu \approx 0{,}028–0{,}032$) та помірне зростання втрати маси ($\Delta m \approx 0{,}0003–0{,}0008$ г) у діапазоні навантажень 90–150 Н. Натомість для азотованої сталі 38Х2МЮА характерні нижчі значення зношування при малих навантаженнях ($\Delta m \approx 0{,}0001$ г при 90 Н), однак при підвищенні навантаження до 150 Н спостерігається більш інтенсивне зростання втрати маси (до $\Delta m \approx 0{,}0012$ г) та коефіцієнта тертя ($\mu \approx 0{,}034$), що пов'язано з відсутністю ефекту самозмащення та переходом до абразивного механізму зношування.

Встановлено, що залежності коефіцієнта тертя та втрати маси від навантаження мають нелінійний характер, що обумовлено переходами між режимами мащення та зміною домінуючих механізмів зношування. У зв'язку з цим наведені графічні залежності слід розглядати як прогнозні, що відображають загальні тенденції зміни параметрів у заданому діапазоні навантажень. Водночас, враховуючи обмеженість дослідження (використання лише двох розрахункових точок), отримані залежності мають оціночний характер і потребують подальшої експериментальної верифікації.

Показано, що зі збільшенням навантаження від 90 до 150 Н мінімальна товщина мастильної плівки зменшується з $h_0 \approx 6{,}1$ до $h_0 \approx 5{,}6$ мкм, що відповідає переходу до більш інтенсивного змішаного режиму мащення. При цьому розрахункова швидкість формування гідродинамічного режиму становить 0,1–0,25 об/с, однак у реальних умовах експлуатації переважає змішаний режим мащення.

Таким чином, встановлено, що в умовах змінних навантажень і частих пусків визначальним фактором є антифрикційні властивості матеріалу, тоді як підвищення

твердості поверхні є ефективним лише за стабільних умов мащення. Практично це означає, що антифрикційні матеріали типу БрОЦС5-5-5 доцільно застосовувати у вузлах із нестабільними режимами роботи та підвищеним ризиком граничного тертя, тоді як зміцнені сталі доцільніші для вузлів із контрольованими умовами мащення та відносно сталими навантаженнями.

Перспективи подальших досліджень полягають у проведенні розширених експериментальних випробувань у ширшому діапазоні навантажень і швидкостей, а також у дослідженні впливу складу мастильного матеріалу та мікроструктури поверхневих шарів на триботехнічні характеристики вузлів тертя.

Література

1. Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W. (2014). Engineering Tribology (4th ed.). Butterworth-Heinemann, 1–884.

2. Hamrock, B.J., Schmid, S.R., Jacobson, B.O. (2004). Fundamentals of Fluid Film Lubrication (2nd ed.). CRC Press, 1–692.

3. Profito, F.J. (2024). *Friction reduction mechanisms in textured journal bearings under engine-like conditions.* Tribology International, 194, 109563.

4. Dass, T.D., et al. (2024). *Investigation of journal bearing characteristics incorporating variable viscosity and surface texturing.* Results in Engineering, 21, 101593.

5. Perremans, Y., et al. (2024). *Impact of advanced lubrication strategies on friction reduction in rotating machinery.* Tribology International, 193, 109480.

6. Granja, V., Higgs, C.F. (2026). *Data-driven prediction of friction and wear in lubricated tribosystems.* Lubricants, 14(1), 22.

7. Zeng, Q., et al. (2025). *Advances in lubrication and wear behavior in modern tribological systems.* Tribology International, 198, 110245.

8. Liu, Y., et al. (2024). *Self-lubricating coatings for improving tribological performance of sliding bearings.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J, 238(6), 745–758

WPŁYW SKŁADU CHEMICZNEGO NA ZDOLNOŚĆ DO ZESZKLENIA I TWARDOŚĆ WYBRANYCH STOPÓW Z UKŁADU Fe-Cr-Mo-B-C WYTWORZONYCH METODĄ MELT SPINNING

Górski K.[1], Kredowska I. [1], Pilarczyk W. [1]
[1] Politechnika Śląska, Polska

Streszczenie

W pracy przedstawiono wpływ składu chemicznego na zdolność do zeszklenia i właściwości mechaniczne taśm stopów Fe-Cr-Mo-B-C. Materiał przygotowano w postaci litej, a następnie przetopiono i poddano szybkiemu chłodzeniu w celu uzyskania struktury amorficznej. Otrzymane taśmy poddano analizie strukturalnej z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), obserwacjom mikroskopowym przy użyciu mikroskopu stereoskopowego oraz badaniom twardości metodą Vickersa. Wykazano istotny wpływ składu chemicznego na zdolność do zeszklenia materiału oraz jakość powierzchni taśm. Stop $Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15}$ wykazywał strukturę amorficzną, natomiast $Fe_{55}Cr_{25}Mo_{16}B_2C_2$ w pełni krystaliczną. Stop $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$ charakteryzował się strukturą amorficzno-nanokrystaliczną. Zaobserwowano wyraźne różnice morfologii pomiędzy stroną matową i szklistą, wynikające z warunków chłodzenia. Najwyższą twardość uzyskano dla stopu $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$, co może być związane z obecnością faz bogatych w bor. Wyniki potwierdzają, że właściwości materiałów są wynikiem złożonej interakcji składu chemicznego, struktury oraz parametrów procesu.

Słowa kluczowe

Szkła metaliczne, melt spinning, zdolność do zeszklenia, dyfrakcja rentgenowska, twardość Vickersa

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE GLASS-FORMING ABILITY AND HARDNESS OF SELECTED Fe-Cr-Mo-B-C ALLOYS MADE BY MELT SPINNING

Górski K.[1], Kredowska I. [1], Pilarczyk W. [1]
[1] Silesian University of Technology, Poland

Abstract

The study presents the influence of chemical composition on the glass-forming ability and mechanical properties of Fe-Cr-Mo-B-C alloy ribbons. The material was prepared in solid form, subsequently remelted, and rapidly solidified to obtain an amorphous structure. The produced ribbons were characterized using X-ray diffraction (XRD), stereoscopic microscopy, and Vickers hardness measurements.

A significant effect of chemical composition on the glass-forming ability and surface quality of the ribbons was demonstrated. $Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15}$ alloy exhibited a fully amorphous structure, while $Fe_{55}Cr_{25}Mo_{16}B_2C_2$ showed a predominantly crystalline character. $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$ alloy revealed an amorphous-nanocrystalline structure. Clear differences in morphology between the matte and shiny sides of the ribbons were observed, resulting from different cooling conditions. The highest hardness was obtained for the $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$ alloy, which may be associated with the presence of boron-rich phases. The results confirm that the properties of the materials are governed by a complex interaction between chemical composition, structure, and processing parameters.

Keywords

Metallic glasses, melt spinning, glass-forming ability, x-ray diffraction, Vickers hardness

Wprowadzenie

Metaliczne materiały amorficzne, określane również jako szkła metaliczne, stanowią szczególną grupę stopów charakteryzujących się brakiem dalekozasięgowego uporządkowania atomowego, typowego dla materiałów krystalicznych [1]. W przeciwieństwie do klasycznych stopów metali, ich struktura przypomina ciecz „zamrożoną" w stanie stałym, co prowadzi do występowania unikalnych właściwości fizycznych i mechanicznych [1]. Do najważniejszych z nich należą wysoka twardość, duża wytrzymałość mechaniczna oraz dobra odporność na korozję [1]. Właściwości te wynikają bezpośrednio z jednorodnej struktury, pozbawionej granic ziaren i defektów charakterystycznych dla materiałów krystalicznych [2].

Jednym z kluczowych zagadnień związanych z wytwarzaniem szkieł metalicznych jest uzyskanie odpowiednio wysokiej szybkości chłodzenia, niezbędnej do zahamowania procesów krystalizacji [3]. W tym celu powszechnie stosuje się metodę melt spinning, polegającą na gwałtownym chłodzeniu ciekłego stopu na powierzchni szybko obracającego się, intensywnie chłodzonego bębna, najczęściej wykonanego z miedzi [4]. Proces ten umożliwia osiągnięcie szybkości chłodzenia rzędu 10^4-10^6 K/s, co umożliwia formowanie cienkich taśm o strukturze amorficznej [4]. Na zdolność do zeszklenia stopu wpływają zarówno parametry procesu wytwarzania, jak i jego skład chemiczny, które determinują kinetykę krystalizacji oraz stabilność fazy amorficznej [5]. W związku z tym istotne jest określenie zależności pomiędzy warunkami wytwarzania, składem stopu a uzyskiwaną strukturą oraz właściwościami mechanicznymi materiału [3].

Szkła metaliczne

Zasadniczym zagadnieniem w kontekście materiałów amorficznych jest zależność pomiędzy ich strukturą a właściwościami użytkowymi. Brak dalekozasięgowego uporządkowania atomowego skutkuje eliminacją klasycznych mechanizmów odkształcenia plastycznego opartych na ruchu dyslokacji [1]. W konsekwencji deformacja materiału ma charakter silnie zlokalizowany i przebiega poprzez inicjację oraz propagację pasm ścinania [1]. Zjawisko to bezpośrednio wpływa na wysoką twardość oraz ograniczoną plastyczność makroskopową szkieł metalicznych [6].

Istotnym aspektem opisu tych materiałów jest ich metastabilność. Struktura amorficzna jako stan nierównowagowy, wykazuje tendencję do przechodzenia w bardziej stabilną strukturę

krystaliczną [7]. Proces ten może zachodzić zarówno podczas nagrzewania, jak i w wyniku oddziaływań mechanicznych, prowadząc do zmian właściwości materiału [8]. W początkowym etapie obserwuje się często powstawanie struktur amorficzno-nanokrystalicznych, które mogą modyfikować własności mechaniczne stopu [9].

Kluczowym parametrem w analizie stopów amorficznych jest zdolność do zeszklenia determinująca możliwość uzyskania struktury amorficznej w danych warunkach technologicznych [10]. Parametr ten pozostaje silnie zależny od składu chemicznego układu [11]. Wzrost liczby składników, różnice w promieniach atomowych oraz charakter oddziaływań międzyatomowych prowadzą do zwiększenia tzw. frustracji strukturalnej, utrudniającej zarodkowanie i wzrost faz krystalicznych [11].

Zależności te zostały ujęte w regułach empirycznych zaproponowanych przez Akihisa Inoue, które wskazują na konieczność stosowania układów wieloskładnikowych, o zróżnicowanych promieniach atomowych oraz korzystnych ujemnych entalpiach mieszania [3]. W przypadku stopów na bazie żelaza spełnienie tych warunków jest szczególnie istotne, ze względu na ich relatywnie niższą zdolność do zeszklenia w porównaniu ze szkłami na osnowie cyrkonu czy palladu [3]. Odpowiedni dobór składu chemicznego umożliwia jednak stabilizację struktury amorficznej oraz kontrolę procesów krystalizacji, co ma bezpośrednie znaczenie w kontekście kształtowania właściwości mechanicznych badanych stopów [5].

Melt spinning

Proces melt spinning należy do najczęściej stosowanych metod wytwarzania taśm amorficznych, umożliwiających uzyskanie bardzo wysokich szybkości chłodzenia ciekłego stopu [4]. Kluczowym aspektem tej technologii jest kontrola warunków krzepnięcia, które determinują możliwość zahamowania procesów krystalizacji oraz uzyskania struktury amorficznej [3].

Istotną rolę w procesie odgrywają parametry technologiczne, wpływające bezpośrednio na kinetykę odprowadzania ciepła [4]. Do najważniejszych z nich zalicza się prędkość obrotową bębna, temperaturę ciekłego stopu, odległość dyszy od powierzchni bębna oraz ciśnienie wyrzutu ciekłego metalu [4]. Wzrost prędkości obrotowej bębna prowadzi do zwiększenia szybkości chłodzenia, co sprzyja formowaniu struktury amorficznej [3]. Z kolei zbyt wysoka temperatura stopu lub niewłaściwa geometria strugi mogą skutkować lokalnym spadkiem efektywności chłodzenia i inicjacją krystalizacji [12].

Charakterystyczną cechą procesu jest powstawanie dwóch odmiennych powierzchni taśmy, wynikających z asymetrii warunków chłodzenia [4]. Strona mająca bezpośredni kontakt z bębnem cechuje się wyższą szybkością odprowadzania ciepła oraz większą jednorodnością strukturalną, natomiast strona swobodna może wykazywać większą chropowatość oraz większą podatność na występowanie defektów powierzchniowych [12]. Różnice te mogą mieć istotny wpływ na właściwości mechaniczne oraz zachowanie materiału podczas dalszej obróbki i eksploatacji [12].

Oprócz parametrów procesowych istotne znaczenie ma również skład chemiczny stopu, który wpływa na lepkość ciekłego metalu, zdolność do formowania stabilnej strugi oraz podatność na krystalizację [11]. W praktyce oznacza to konieczność jednoczesnej optymalizacji składu oraz parametrów procesu w celu uzyskania jednorodnych taśm o strukturze amorficznej [3].

Wytwarzane metodą melt spinning taśmy charakteryzują się niewielką grubością, zazwyczaj rzędu kilkudziesięciu mikrometrów, co dodatkowo sprzyja efektywnemu odprowadzaniu ciepła [4]. Jednocześnie ograniczona grubość materiału wpływa na jego właściwości użytkowe oraz zakres potencjalnych zastosowań, co stanowi istotny aspekt przy projektowaniu materiałów amorficznych i doborze technologii ich wytwarzania [5].

Cel pracy

Celem pracy było określenie wpływu metody wybraną metodą wytwarzania (melt spinning) oraz składu chemicznego na zdolność do zeszklenia wybranych stopów z układu Fe-

Cr-Mo-B-C oraz ich właściwości mechaniczne. W ramach badań wytworzono taśmy w kontrolowanych warunkach technologicznych, a następnie przeprowadzono ich charakterystykę strukturalną i właściwościową. Ocenę udziału faz amorficznych wykonano z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej (ang. *X-Ray Diffraction,* XRD), natomiast analizę morfologii powierzchni przeprowadzono przy użyciu mikroskopii stereoskopowej. Właściwości mechaniczne określono na podstawie pomiarów twardości metodą Vickersa. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie zależności pomiędzy wybraną technologią wytwarzania, składem stopu a uzyskaną strukturą i właściwościami badanych taśm.

Materiał i metodyka badań

Do przygotowania taśm wykorzystano pierwiastki w postaci litej. Dla każdego wariantu stopu odważono naważki o masie 50 g, które następnie poddano wstępnemu przetopieniu w nagrzewnicy indukcyjnej w atmosferze ochronnej argonu w celu uzyskania jednorodnego materiału. Otrzymane odlewy rozdrobniono w celu uzyskania wsadu przeznaczonego do przetwarzania w procesie odlewania taśm. Przykładowy odlew przedstawiono na rysunku 1. Składy chemiczne przygotowanych stopów zestawiono w tabeli 1.

Rys. 1. Przykładowy wstępny odlew po przetapianiu indukcyjnym

Tabela 1. Udziały masowe pierwiastków w rozpatrywanych stopach

Skład nominalny stopu	**Fe [g]**	**Cr [g]**	**Mo [g]**	**B [g]**	**C [g]**
$Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15}$	41,86	3,64	2,88	1,62	-
$Fe_{55}Cr_{25}Mo_{16}B_2C_2$	25,80	10,92	12,9	0,18	0,20
$Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$	40,94	6,73	-	2,33	-

Proces wytwarzania taśm przeprowadzono metodą melt spinning. Fragmenty uprzednio przygotowanego materiału umieszczano w tyglu kwarcowym w komorze urządzenia. Następnie przeprowadzano etap przygotowania próżni wstępnej i wprowadzenia atmosfery ochronnej argonu. Po ustabilizowaniu warunków w komorze rozpoczynano proces poprzez rozruch bębna oraz nagrzewanie wsadu z użyciem cewki indukcyjnej do stanu ciekłego.

Po osiągnięciu pełnego przetopienia materiału następowało jego wypchnięcie z tygla przy użyciu gazu, co prowadziło do formowania cienkiej strugi metalu i jej gwałtownego krzepnięcia na powierzchni obracającego się bębna. Parametry procesu zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry procesu melt spinning

Parametr procesu	**Wartość parametru**
Prędkoś obrotowe koła	30 m/s
Atmosfera gazowa	Argon

Ciśnienie próżni wstępnej	8×10^{-5} bar
Ciśnienie po napełnieniu gazem	0,8 bar
Ciśnienie wypychające	0,3 bar

Wybrana prędkość obrotowa bębna stanowiła kompromis między stabilnością procesu a wymaganiami dotyczącymi uzyskania struktury amorficznej i była optymalna dla melt spinnera Bühler Melt Spinner S.C. Przy wyższych prędkościach taśma ulegałaby zniszczeniu wskutek dużych naprężeń i sił działających podczas formowania. Natomiast przy niższych prędkościach szybkość chłodzenia byłaby zbyt mała, aby zahamować krystalizację, co uniemożliwiłoby uzyskanie struktury amorficznej. Otrzymane taśmy przedstawiono na rysunku 2.

Rys. 2. Zdjęcia makroskopowe odlanych taśm dla stopów: a) $Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15}$, b) $Fe_{55}Cr_{25}Mo_{16}B_2C_2$, c) $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$

Badania składu fazowego otrzymanych taśm przeprowadzono z wykorzystaniem dyfraktometru rentgenowskiego X'Pert PRO MPD (Malvern Panalytical), wyposażonego w lampę rentgenowską z anodą kobaltową (Co Kα, λ = 0,179 nm) oraz detektor PIXcel 3D.

Pomiary wykonano w geometrii Bragga–Brentano w zakresie kątowym 2θ od 20° do 120°, z krokiem pomiarowym 0,05° oraz czasem zliczania 100 s na punkt. Analizę fazową przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania HighScore Plus z bazą danych PAN-ICSD.

Obserwacje powierzchni otrzymanych taśm przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego SteREO Discovery firmy ZEISS. Analizę wykonano stopu $Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15}$, który wykazał najwyższą zdolność do zeszklenia na podstawie badań XRD.

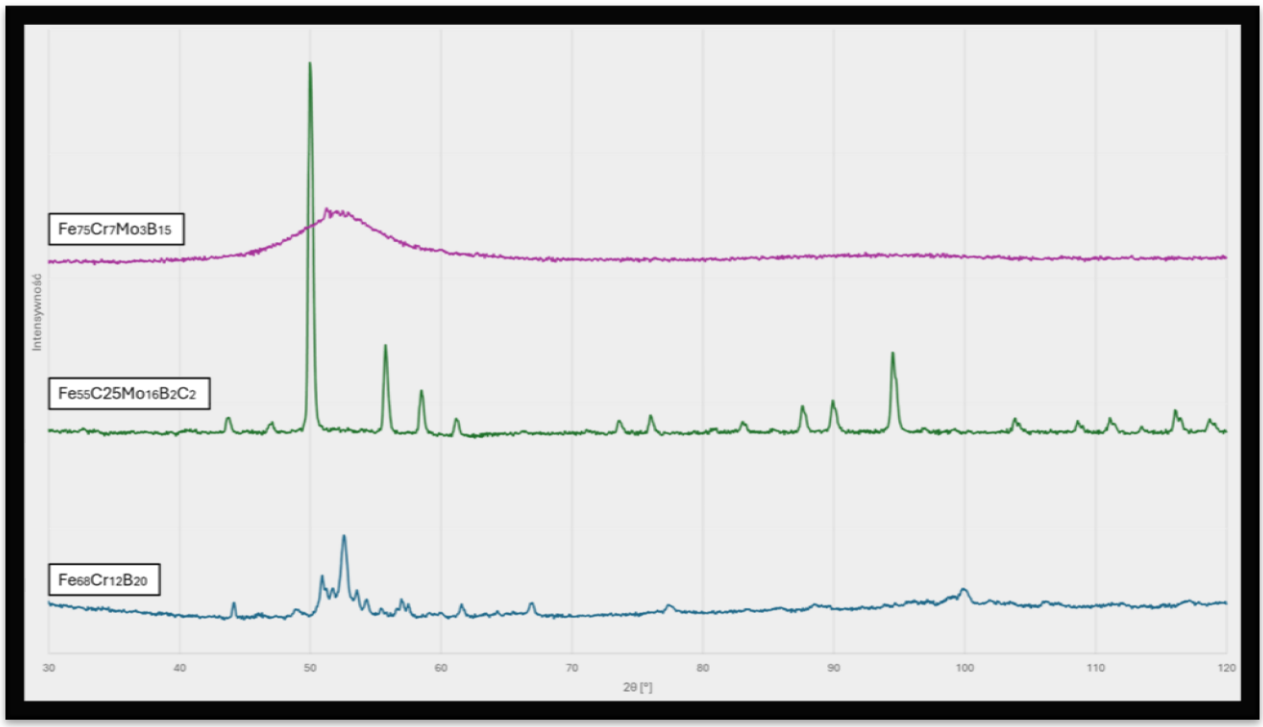
Badania właściwości mechanicznych otrzymanych taśm przeprowadzono z wykorzystaniem pomiarów twardości metodą Vickersa, umożliwiających ocenę odporności materiału na lokalne odkształcenie plastyczne. Analizę wykonano przy użyciu twardościomierza Vickersa z automatycznym torem pomiarowym FUTURE-TECH FM-ARS 9000, wyposażonego w system analizy obrazu.

Pomiary przeprowadzono przy obciążeniu 50 gf (HV0,05) i czasie pomiaru wynoszącym 10 s. Dla każdej próbki wykonano serię pięciu odcisków w różnych obszarach powierzchni, co umożliwiło wyznaczenie wartości średniej oraz odchylenia standardowego.

Wyniki badań

Przedstawione na rysunku 2. taśmy wykazują wyraźne różnice w jakości formowania w zależności od składu stopu. W przypadku $Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15}$ uzyskano ciągłe, dobrze uformowane taśmy, co świadczy o stabilnym przebiegu procesu. Dla stopu $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$ taśmy były krótsze i mniej jednorodne, natomiast stop $Fe_{55}Cr_{25}Mo_{16}B_2C_2$ charakteryzował się bardzo słabą zdolnością do formowania taśmy; materiał ulegał fragmentacji do drobnych, kruchych odłamków.

Dyfraktogramy otrzymanych taśm przedstawiono na rysunku 3. Uzyskane wyniki wykazują wyraźne różnice w charakterze struktury w zależności od składu chemicznego, co może również wiązać się z jakością uzyskanych taśm, omówioną w poprzednim akapicie.



Rys. 3. Dyfraktogramy wytworzonych taśm dla stopów: a) $Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15}$, b) $Fe_{55}Cr_{25}Mo_{16}B_2C_2$, c) $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$

W przypadku stopu $Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15}$ zaobserwowano szerokie maksimum dyfrakcyjne (tzw. halo), jednoznacznie wskazujące na amorficzny charakter struktury. Brak wyraźnych pików krystalicznych potwierdza skuteczne zahamowanie procesów krystalizacji podczas szybkiego chłodzenia.

Odmienny charakter wykazują próbki stopu $Fe_{55}Cr_{25}Mo_{16}B_2C_2$, dla którego zarejestrowano liczne, wąskie i intensywne piki dyfrakcyjne. Świadczy to o dominującej obecności faz krystalicznych oraz braku zdolności do tworzenia struktury amorficznej w zastosowanych warunkach technologicznych. Obecność wielu refleksów o wysokiej intensywności sugeruje rozwiniętą strukturę wielofazową. Może to wynikać zarówno z niewystarczającej szybkości chłodzenia, jak i z niekorzystnego składu chemicznego pod względem zdolności do zeszklenia.

Dla stopu $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$ dyfraktogram zawiera zarówno szerokie halo, charakterystyczne dla fazy amorficznej, jak i słabe, lokalne maksima intensywności. Wskazuje to na częściową krystalizację materiału i powstanie struktury amorficzno-nanokrystalicznej. Taki charakter struktury sugeruje, że osiągnięta szybkość chłodzenia była bliska wartości krytycznej. Obecność nanokrystalitów może jednak wpływać na właściwości mechaniczne materiału, często prowadząc do ich dalszej modyfikacji względem w pełni amorficznego stanu.

W literaturze dla stopów z układu Fe-Cr-Mo-B-C obserwuje się obecność różnorodnych faz krystalicznych powstających w trakcie krystalizacji materiału. Do najczęściej

identyfikowanych należą fazy roztworu stałego żelaza (α-Fe lub α-FeCr), a także liczne fazy bogate w bor i węgiel. W szczególności wskazuje się na obecność borków, takich jak $(Fe,Cr)_2B$ oraz Fe_3B, a także węglików typu $M_{23}(C,B)_6$ oraz M_7C_3 (gdzie M = Fe, Cr, Mo). W stopach zawierających molibden możliwe jest również powstawanie bardziej złożonych faz, takich jak $FeMo_2B_2$ czy Fe_3Mo_3C, a także związków międzymetalicznych z udziałem chromu i molibdenu [13,14,15]. Należy jednak podkreślić, że znaczna liczba potencjalnych faz oraz ich zbliżone położenie refleksów dyfrakcyjnych prowadzą do nakładania się pików, szczególnie w przypadku borków i węglików, co istotnie utrudnia jednoznaczną identyfikację fazową i wymaga przeprowadzenia szczegółowej, czasochłonnej analizy z wykorzystaniem zaawansowanych metod dopasowania widm.

Rys. 4. Zdjęcia stereoskopowe taśmy wytworzonej ze stopu $Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15}$

Na rysunku 4 przedstawiono obrazy powierzchni taśm z uwzględnieniem różnic pomiędzy stroną matową (kontaktową) a stroną szklistą (swobodną), obserwowanych przy różnych powiększeniach. Już na poziomie makroskopowym widoczny jest wyraźny kontrast pomiędzy obiema powierzchniami, który wynika bezpośrednio z odmiennych warunków odprowadzania ciepła w trakcie procesu melt spinningu.

Strona matowa, będąca w bezpośrednim kontakcie z powierzchnią bębna chłodzącego, charakteryzuje się silnie rozwiniętą, niejednorodną morfologią. Widoczne są liczne ślady kierunkowego przepływu ciekłego metalu w postaci wydłużonych struktur oraz pasmowych nierówności, zgodnych z kierunkiem ruchu bębna. Struktura ta wskazuje na dynamiczny przebieg procesu krzepnięcia oraz obecność lokalnych zaburzeń przepływu strugi ciekłego metalu. Dodatkowo obserwuje się drobne zagłębienia, nierówności oraz lokalne zmiany topografii powierzchni, które mogą być związane z fluktuacjami temperatury oraz niestabilnością kontaktu cieplnego pomiędzy metalem a bębnem. Wysoka szybkość chłodzenia prowadzi do „zamrożenia" tych niejednorodności w strukturze powierzchni.

Z kolei strona szklista wykazuje znacznie bardziej jednorodny i wygładzony charakter. Przy mniejszych powiększeniach powierzchnia ta wydaje się niemal ciągła i pozbawiona wyraźnych defektów makroskopowych. Dopiero przy większych powiększeniach widoczne są pojedyncze nieciągłości, takie jak pęcherzyki gazowe, drobne wtrącenia lub lokalne zaburzenia powierzchni. Ich obecność może wynikać z uwięzienia gazów lub lokalnych zmian lepkości ciekłego metalu w trakcie krzepnięcia. Gładkość tej powierzchni jest efektem działania napięcia

powierzchniowego, które w warunkach braku kontaktu z podłożem prowadzi do minimalizacji energii powierzchniowej i wygładzenia struktury.

Zaobserwowane różnice pomiędzy stroną matową i szklistą jednoznacznie wskazują na kluczową rolę warunków wymiany ciepła, gradientu temperatury oraz dynamiki przepływu ciekłego metalu w kształtowaniu morfologii powierzchni taśm. Strona kontaktowa odzwierciedla warunki intensywnego chłodzenia i wymuszonego przepływu, natomiast strona swobodna - bardziej równowagowy charakter krzepnięcia.

Tabela 3. Wyniki uśrednionych mikrotwardości Vickersa dla wytworzonych taśm

Oznaczenie próbki	**Wartość [$HV_{0,05}$]**			
	Strona szklista		**Strona matowa**	
	Średnia	**Odchylenie**	**Średnia**	**Odchylenie**
$Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15}$	945	26	847	20
$Fe_{55}Cr_{25}Mo_{16}B_2C_2$	993	62	1082	24
$Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$	1144	25	1157	34

Tabela 3 przedstawia wyniki mikrotwardości Vickersa ($HV_{0,05}$) dla otrzymanych taśm, z rozróżnieniem na stronę szklistą oraz matową. Uzyskane wartości mieszczą się w wysokim zakresie, typowym dla materiałów o strukturze amorficznej lub drobnoziarnistej, co potwierdza skuteczność zastosowanej technologii szybkiego chłodzenia. Jednocześnie widoczne różnice pomiędzy badanymi stopami wskazują na istotny wpływ zarówno składu chemicznego, jak i lokalnych warunków krzepnięcia na właściwości mechaniczne materiału.

Analiza szczegółowa wykazuje, że dla stopu $Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15}$ wyższą twardość uzyskano po stronie szklistej (945 HV) niż matowej (847 HV), przy stosunkowo niskich odchyleniach standardowych, co świadczy o dobrej jednorodności struktury. W przypadku stopu $Fe_{55}Cr_{25}Mo_{16}B_2C_2$ zaobserwowano odwrotną zależność, wyższą twardość wykazuje strona matowa (1082 HV), natomiast większe rozproszenie wyników pojawia się dla strony szklistej (odchylenie 62 HV), co sugeruje większą heterogeniczność materiału. Może wiązać się to również z jakością taśm tuż po odlaniu, co również tłumaczyłoby wyższe odchylenie standardowe. Z kolei stop $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$ charakteryzuje się najwyższymi wartościami twardości dla obu analizowanych powierzchni (1144-1157 HV), przy jednocześnie niewielkich odchyleniach standardowych, co wskazuje na relatywnie jednorodną i stabilną mikrostrukturę. Porównanie wyników dla strony szklistej i matowej nie wykazuje jednoznacznej tendencji, jednak lokalne różnice mogą wynikać z niejednorodności strukturalnej oraz obecności defektów powierzchniowych powstałych podczas procesu wytwarzania.

Dodatkowo zaobserwowano istotny wpływ składu chemicznego na uzyskiwane wartości twardości. Najwyższe wartości odnotowano dla stopu $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$, pomimo braku dodatków molibdenu i węgla, a także pomimo braku struktury w pełni amorficznej. Może to być związane z obecnością twardych faz bogatych w bor, takich jak borki żelaza, które charakteryzują się bardzo wysoką twardością i efektywnie ograniczają ruch dyslokacji, zwiększając odporność materiału na odkształcenie plastyczne. Jednocześnie drobna dyspersja takich faz w osnowie może prowadzić do efektu umocnienia dyspersyjnego, co dodatkowo podnosi twardość całkowitą materiału. W przypadku stopów zawierających molibden oraz węgiel możliwe jest natomiast powstawanie bardziej złożonych faz, w tym borków, węglików oraz związków międzymetalicznych z udziałem molibdenu, takich jak $FeMo_2B_2$ czy fazy typu $M_{23}(C,B)_6$ oraz M_7C_3. Należy jednak podkreślić, że obecność licznych faz krystalicznych nie zawsze przekłada się na wzrost twardości makroskopowej. W przypadku struktur o dominującym charakterze krystalicznym lub o większych rozmiarach ziaren może dochodzić do obniżenia efektywnego

umocnienia materiału. Ponadto interakcje pomiędzy poszczególnymi fazami, w tym ich granice międzyfazowe, mogą stanowić miejsca inicjacji odkształcenia, co dodatkowo wpływa na obserwowane wartości twardości. W efekcie końcowa twardość materiału stanowi wynik złożonej równowagi pomiędzy udziałem faz twardych, stopniem rozdrobnienia struktury oraz jej jednorodnością [13,14,15].

Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że skład chemiczny ma kluczowy wpływ na strukturę oraz właściwości badanych stopów z układu Fe-Cr-Mo-B-C. Najwyższą zdolność do zeszklenia uzyskano dla stopu $Fe_{75}Cr_7Mo_3B_{15,}$ podczas gdy stop $Fe_{55}Cr_{25}Mo_{16}B_2C_2$ wykazywał dominujący charakter krystaliczny. Stop $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$ charakteryzował się strukturą pośrednią, wskazującą na obecność fazy amorficzno-nanokrystalicznej. Otrzymane wyniki potwierdzają, że nawet niewielkie zmiany składu chemicznego mogą istotnie wpływać na kinetykę krystalizacji oraz zdolność do formowania struktury amorficznej podczas szybkiego chłodzenia.

Analiza uzyskanych dyfraktogramów oraz obserwacje makro- i mikroskopowe wykazały ścisłą korelację pomiędzy strukturą a przebiegiem procesu formowania taśm. Stopy o wyższej zdolności do zeszklenia tworzyły ciągłe, jednorodne taśmy o dobrej jakości powierzchni, natomiast materiały o dominującym charakterze krystalicznym wykazywały tendencję do fragmentacji i niestabilnego formowania. Jednocześnie zaobserwowano wyraźne różnice pomiędzy stroną matową i szklistą, wynikające z odmiennych warunków chłodzenia, co potwierdza istotną rolę gradientu temperatury oraz dynamiki przepływu ciekłego metalu w kształtowaniu morfologii powierzchni.

Uzyskane wyniki twardości wskazują, że najwyższy stopień amorficzności nie zawsze prowadzi do maksymalnych wartości twardości. Na właściwości mechaniczne istotny wpływ mają również defekty powierzchniowe, jednorodność struktury oraz obecność faz krystalicznych, takich jak borki, węgliki i fazy z udziałem molibdenu. W szczególności wysoka twardość stopu $Fe_{68}Cr_{12}B_{20}$ może być związana z obecnością faz bogatych w bor, które efektywnie zwiększają odporność materiału na odkształcenie poprzez mechanizmy umocnienia dyspersyjnego.

Podsumowując, optymalizacja procesu wytwarzania taśm metodą melt spinning wymaga jednoczesnego uwzględnienia zdolności do zeszklenia, stabilności formowania, jakości powierzchni oraz docelowych właściwości mechanicznych. Uzyskane wyniki wskazują, że dobór składu chemicznego powinien być ściśle powiązany z parametrami procesu, tak aby osiągnąć kompromis pomiędzy amorficznością struktury a korzystnymi właściwościami użytkowymi materiału.

Dalsze plany badań

W celu pogłębienia analizy otrzymanych wyników planowane jest przeprowadzenie szczegółowej identyfikacji fazowej badanych stopów. Pozwoli to na jednoznaczne określenie obecności faz krystalicznych oraz ich wpływu na właściwości mechaniczne materiału.

Dodatkowo przewiduje się wykonanie obserwacji mikrostruktury przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) wraz z analizą składu chemicznego metodą EDS. Badania te umożliwią ocenę jednorodności materiału, identyfikację lokalnych wydzieleń oraz określenie rozmieszczenia pierwiastków w obrębie struktury.

W przypadku stopów wykazujących najwyższą zdolność do zeszklenia planowane jest również przeprowadzenie analizy termicznej metodą DSC, w celu określenia parametrów charakterystycznych dla przemian fazowych, takich jak temperatura krystalizacji oraz stabilność struktury amorficznej.

Realizacja powyższych badań umożliwi pełniejsze zrozumienie zależności pomiędzy składem chemicznym, strukturą a właściwościami materiałów oraz pozwoli na dalszą optymalizację parametrów procesu wytwarzania.

Bibliografia

1. Schuh, C. A., Hufnagel, T. C., Ramamurty, U., Mechanical behavior of amorphous alloys, Acta Materialia, 55(12), 4067–4109, 2007.
2. Greer, A. L., Ma, E., Bulk metallic glasses: At the cutting edge of metals research, MRS Bulletin, 32(8), 611–619 (2007).
3. Inoue, A., Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys, Acta Materialia, 48(1), 279–306, 2000.
4. Chen, H. S., Metallic glasses, Materials Science and Engineering, 25, 59–69 (1976).
5. Wang, W. H., Roles of minor additions in formation and properties of bulk metallic glasses, Progress in Materials Science, 52, 540–596, 2007.
6. Schuh, C. A., Hufnagel, T. C., Ramamurty, U., Mechanical behavior of amorphous alloys, Acta Materialia, 55(12), 4067–4109, 2007.
7. Greer, A. L., Metallic glasses… on the threshold, Materials Today, 12(1–2), 14–22, 2009.
8. Busch, R., Thermodynamics and kinetics of bulk metallic glass, MRS Bulletin, 32, 620–623 (2007).
9. Kulik, T., Nanocrystallization of metallic glasses, Journal of Non-Crystalline Solids, 287(1–3), 145–161 (2001).
10. Wang, W. H., The elastic properties, elastic models and elastic perspectives of metallic glasses, Progress in Materials Science, 57, 487–656, 2012.
11. Ma, E., Tuning order in disorder, Nature Materials, 14, 547–552, 2015.
12. Schroers, J., Bulk metallic glasses, Physics Today, 66(2), 32–37, 2013.
13. Dong, Q., Song, P., Tan, J., Qin, X. M., Li, C. J., Gao, P., Feng, Z. X., Calin, M., Eckert, J., Non-isothermal crystallization kinetics of a Fe–Cr–Mo–B–C amorphous powder, Journal of Alloys and Compounds, 823, 153783, 2020.
14. Ma, X., Zhang, W., Xiang, Q., Ren, Y., Yu, B., Wang, J., Qiu, K., The microstructure and mechanical properties of three Fe–Cr–Mo–B bulk amorphous alloy composites, Materials Letters, 400, 139116, 2025.
15. Kiminami, C. S., Souza, C. A. C., Bonavina, L. F., de Andrade Lima, L. R. P., Suriñach, S., Baró, M. D., Bolfarini, C., Botta, W. J., Partial crystallization and corrosion resistance of amorphous Fe–Cr–M–B (M = Mo, Nb) alloys, Journal of Non-Crystalline Solids, 356, 2651–2657, 2010.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО КОНСТРУКЦІЇ ТА МАТЕРІАЛІВ ДИТЯЧИХ АВТОМОБІЛЬНИХ КРІСЕЛ

Бідюк В., Посонський С.
Хмельницький національний університет, Україна

Анотація

У роботі розглянуто основні вимоги до конструкції дитячих автомобільних крісел (ДАК), що забезпечують безпечне перевезення дітей у транспортних засобах. Проаналізовано нормативну базу, зокрема стандарти ECE R44/04, ECE R129 (i-Size) та ДСТУ ISO 13216, які регламентують вимоги до систем утримання та кріплення. Досліджено конструктивні елементи ДАК, включаючи каркас, енергопоглинаючі вставки, систему ременів та кріплення ISOFIX. Особливу увагу приділено матеріалам, що використовуються у виробництві, їх фізико-механічним властивостям і впливу на безпеку та довговічність виробу. Наведено аналіз поєднання жорстких і еластичних матеріалів, що забезпечують оптимальний баланс між міцністю та енергопоглинанням.

Ключові слова

Дитяче автомобільне крісло, безпека, ISOFIX, полімерні матеріали, енергопоглинання, конструкція.

GENERAL REQUIREMENTS FOR THE DESIGN AND MATERIALS OF CHILD CAR SEATS

Abstract

The paper examines the main design requirements for child car seats (CCS) ensuring safe transportation of children in vehicles. The regulatory framework is analyzed, including ECE R44/04, ECE R129 (i-Size), and DSTU ISO 13216 standards, which define requirements for restraint and fastening systems. Structural elements of CCS such as frame, energy-absorbing inserts, harness systems, and ISOFIX mounting are studied. Special attention is paid to materials used in manufacturing, their physical and mechanical properties, and their impact on safety and durability. The study highlights the importance of combining rigid and elastic materials to achieve an optimal balance between strength and energy absorption.

Keywords

Child car seat, safety, ISOFIX, polymer materials, energy absorption, design.

Вступ

Безпека перевезення дітей у транспортних засобах є одним із пріоритетних напрямів сучасного автомобілебудування. Дитячі автомобільні крісла (ДАК) виступають ключовим елементом систем пасивної безпеки, що забезпечує зниження травматизму під час дорожньо-транспортних пригод. Вимоги до їх конструкції регламентуються міжнародними стандартами ECE R44/04, ECE R129 (i-Size), а також національними стандартами ДСТУ ISO 13216-1:2016 та ДСТУ ISO 13216-2:2016.

Сучасні тенденції розвитку ДАК спрямовані на підвищення рівня безпеки, ергономічності та універсальності конструкцій, що досягається за рахунок використання інноваційних матеріалів і технологій.

Об’єкт та методи дослідження

Об’єктом дослідження є конструкція дитячого автомобільного крісла та матеріали, що застосовуються для його виготовлення.

Методи дослідження включають:

1) аналіз нормативної документації;
2) порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей матеріалів;
3) структурно-функціональний аналіз елементів конструкції;
4) узагальнення сучасних технологічних рішень у виробництві ДАК.

Постановка завдання

Метою роботи є визначення основних конструктивних вимог до дитячих автомобільних крісел, аналіз матеріалів та технологій їх виготовлення, а також оцінка їх впливу на безпеку та експлуатаційні характеристики виробу.

Результати та їх обговорення

Конструкція дитячого автомобільного крісла (ДАК), рис. 1, формується з урахуванням комплексних вимог до пасивної безпеки, ергономічності та довговічності виробу, що регламентуються міжнародними нормативними документами ECE R44/04 та ECE R129 (i-Size) [1, 2]. Відповідно до цих стандартів, крісло повинно забезпечувати ефективний захист дитини при фронтальних, бокових та задніх зіткненнях, а також мінімізувати ризик неправильного встановлення.

За конструктивними ознаками та масово-віковими групами дітей виділяють типи, наведені в таблиці 1.

Рис. 1. Основні елементи конструкції дитячого автомобільного крісла: 1 – каркас; 2 – енергопоглинаючі елементи; 3 – система утримання; 4 – підголівник і спинка; 5 – м'яке сидіння і чохол; 6 – система кріплення до кузова автомобіля.

Однією з ключових функцій ДАК є надійна фіксація тіла дитини у безпечному положенні. Це досягається завдяки використанню п'ятиточкових ременів безпеки або штатних ременів автомобіля (для старших вікових груп). П'ятиточкова система забезпечує рівномірний розподіл навантаження на плечі, таз і міжстегнову зону, що зменшує ризик травмування внутрішніх органів під час удару. Відповідно до вимог стандартів, ремені повинні витримувати значні розривні навантаження та зберігати свої властивості в умовах температурних коливань [2].

Табл. 1. Класифікація дитячих автомобільних крісел за конструкцією.

Група	Вік дитини	Вага, кг	Тип конструкції
0	до 12 міс	до 10	Люлька, встановлюється проти руху
0+	до 15 міс.	до 13	Автокрісло-колиска з ременями безпеки
I	9 міс. – 4 роки	9–18	Крісло з п'яти точковою системою фіксації
II	3 – 7 років	15–25	Крісло з власною спинкою, дитина фіксується штатним ременем
III	6 – 12 років	22–36	Бустер (сидіння без спинки)

Важливим аспектом є ефективне поглинання енергії удару. У конструкції ДАК застосовуються спеціальні енергопоглинаючі елементи, виготовлені з пінополістиролу (EPS) та екструдованого поліпропілену (EPP). EPS характеризується високою здатністю до одноразового поглинання енергії за рахунок руйнування комірчастої структури, тоді як EPP здатний до багаторазового відновлення після деформації [3]. Поєднання цих матеріалів дозволяє досягти оптимального рівня захисту при різних типах ударів.

Табл. 2. Фізико-механічні властивості матеріалів, застосовуваних у дитячих автомобільних кріслах.

№	Матеріал	Густина, г/см³	Міцність на розтяг, МПа	Модуль пружн., МПа	Ударна в'язк., кДж/м²	Робоча темпер., °C	Основне призначення
1	Поліпропілен (PP)	0,9	25-35	1300-1700	30–50	−20… +100	Корпус, спинка, бокові елементи

2	АБС-пластик	1,05	35-40	2000-2500	20-30	−30… +80	Каркас, декоративні панелі
3	Поліамід (PA66, армований 30% скловолокна)	1,35	90-110	6000-8000	8-15	−40… +120	Несучі частини каркаса, вузли ISOFIX
4	Пінополістирол (EPS)	0,03-0,06	0,2-0,5	10-30	-	−20… +70	Енергопогли наючі вставки
5	Екструдований поліпропілен (EPP)	0,05-0,08	1,0-2,0	40-80	15-20	−30… +110	Боковий захист, демпфуваль ні елементи
6	Поліуретанова піна	0,04-0,06	0,4-0,8	5-10	-	−20… +90	Наповнювач сидіння та підголівника
7	Поліестерова тканина	1,38	-	-	-	−40… +100	Оббивка, знімний чохол
8	Сталь конструкційна	7,85	350-450	210000	60-80	−50…+ 200	Кріпильні елементи, напрямні
9	Поліестерова стрічка	1,38	150-200	2000-3000	40-50	−40…+ 80	Система утримання дитини

Каркас дитячого крісла є основним силовим елементом конструкції, який забезпечує передачу навантажень на кузов автомобіля. Для його виготовлення використовуються полімерні матеріали, такі як поліпропілен (PP), АБС-пластик та поліамід, армований скловолокном. Зокрема, армований поліамід (PA66) має високу міцність (до 110 МПа) та модуль пружності, що дозволяє ефективно протидіяти деформаціям під час аварійних навантажень [4]. Використання таких матеріалів забезпечує необхідну жорсткість конструкції при відносно малій вазі.

Аналіз фізико-механічних властивостей матеріалів, табл. 2, показує, що їх раціональне поєднання є критично важливим для забезпечення функціональності ДАК. Жорсткі полімери виконують несучу функцію, тоді як еластичні матеріали забезпечують демпфування ударних навантажень. Такий підхід відповідає сучасним принципам проектування композитних конструкцій, де досягається баланс між міцністю та енергопоглинанням [5].

Система кріплення дитячого крісла до кузова автомобіля також відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки. Найбільш поширеною є система ISOFIX, рис. 2, яка забезпечує жорстке з’єднання крісла з кузовом через металеві напрямні, рис. 3. Це значно зменшує ризик неправильного встановлення та підвищує стабільність крісла під час руху [6, 7]. Додатковим елементом є анкерна лямка Top Tether, яка обмежує обертання крісла при фронтальному зіткненні.

Особлива увага приділяється боковому захисту (Side Impact Protection – SIP), який реалізується за рахунок посилених бокових стінок та енергопоглинаючих вставок. Дослідження показують, що саме бокові удари становлять значну небезпеку для дітей, оскільки відстань між тілом дитини та джерелом удару є мінімальною. Тому застосування

багатошарових конструкцій із використанням EPP та поліуретанових пін значно підвищує рівень захисту [3].

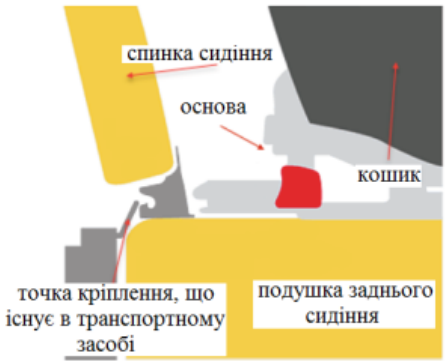


Рис. 2. Система ISOFIX.

Ергономічні характеристики ДАК також мають важливе значення для забезпечення безпеки. Неправильне положення дитини може призвести до підвищених навантажень на шийний відділ хребта під час аварії. Оптимальний кут нахилу спинки (110–125°) дозволяє зменшити ці навантаження та забезпечити комфортне положення під час руху. Регульований підголівник забезпечує підтримку голови та адаптацію крісла до зросту дитини.

Матеріали оббивки відіграють важливу роль у забезпеченні комфорту та гігієнічності. Використання гіпоалергенних тканин із високою зносостійкістю (понад 25000 циклів за методом Мартіндейла) забезпечує довговічність виробу та комфортні умови експлуатації [8]. Крім того, сучасні тканини мають антибактеріальні властивості та здатність до вентиляції, що особливо важливо при тривалих поїздках.

Технологічні процеси виготовлення ДАК також суттєво впливають на їх якість. Основним методом виробництва корпусів є лиття під тиском, що дозволяє отримувати складні геометричні форми з високою точністю. Використання технологій газового підтиснення дозволяє зменшити масу виробу без зниження його міцності. Енергопоглинаючі елементи виготовляються методом спінювання, що забезпечує формування рівномірної комірчастої структури [5].

Контроль якості є невід'ємною частиною виробництва ДАК. Він включає перевірку геометрії каркаса, випробування системи кріплення ISOFIX, тестування ременів безпеки на розрив та проведення краш-тестів. Відповідно до стандартів, крісла повинні проходити серію динамічних випробувань, що імітують реальні дорожньо-транспортні пригоди [1].

Таким чином, результати аналізу показують, що ефективність дитячого автомобільного крісла визначається комплексом факторів: конструкцією, матеріалами, технологією виготовлення та якістю монтажу.

Рис. 2. Схема встановлення система ISOFIX.

Використання сучасних полімерних матеріалів і композитів дозволяє значно підвищити рівень безпеки, зменшити масу виробу та забезпечити комфортні умови для дитини. Інтеграція систем ISOFIX, удосконалення енергопоглинаючих елементів і впровадження нових технологій виробництва є основними напрямами розвитку дитячих автомобільних крісел у сучасному автомобілебудуванні.

Висновки

1. Дитячі автомобільні крісла є важливим елементом пасивної безпеки, що значно знижує ризик травмування дітей у ДТП.
2. Основні вимоги до конструкції ДАК визначаються міжнародними стандартами та включають міцність, енергопоглинання, ергономічність і надійність кріплення.
3. Використання сучасних полімерних матеріалів і композитів дозволяє досягти оптимального поєднання міцності та малої маси.
4. Енергопоглинаючі матеріали (EPS, EPP) відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки.
5. Перспективи розвитку ДАК пов’язані з удосконаленням матеріалів, підвищенням рівня автоматизації виробництва та інтеграцією інтелектуальних систем контролю безпеки.

Література

1. UN ECE Regulation No. 44/04. Uniform provisions concerning the approval of restraining devices for child occupants of power-driven vehicles. – Geneva: UNECE, 2014. – 145 p.
2. UN ECE Regulation No. 129 (i-Size). Enhanced child restraint systems. – Geneva: UNECE, 2018. – 210 p.
3. Gibson L., Ashby M. Cellular Solids: Structure and Properties. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 510 p.
4. Ashby M. Materials Selection in Mechanical Design. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. – 660 p.
5. Friedrich, K. Almajid, A. (2013) *Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications*. Applied Composite Materials, 20, 107-128. https://doi.org/10.1007/s10443-012-9258-7
6. ДСТУ ISO 13216-1:2016. Дорожні транспортні засоби. Кріплення дитячих утримувальних систем ISOFIX. Частина 1. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 32 с.
7. ДСТУ ISO 13216-2:2016. Дорожні транспортні засоби. Кріплення дитячих утримувальних систем ISOFIX. Частина 2. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 28 с.
8. ДСТУ ISO 3795:2003. Транспорт дорожній. Матеріали внутрішнього обладнання. Метод визначення горючості. – Київ: Держстандарт України, 2003. – 18 с.

WPŁYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH DRUKU 3D NA TOPOGRAFIĘ POWIERZCHNI STOPÓW CYRKONU WYKORZYSTYWANYCH W MEDYCYNIE – ANALIZA STANU BADAŃ

Musiał J.[1], Troszyński A.[2], Zasińska K.[3]
[1] Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Polska
[2] Politechnika Bydgoska, Polska
[3] Politechnika Gdańska, Polska

Streszczenie

Niniejszy artykuł przedstawia analizę dotyczącą wpływu parametrów technologicznych wytwarzania przyrostowego na topografię powierzchni stopów cyrkonu wykorzystywanych w zastosowaniach medycznych. W artykule dokonano identyfikacji zależności pomiędzy odmianami technologii druku 3D (SLM, LPBF, EBM, PBF-LB/M) a charakterystyką powierzchni implantów cyrkonowych. Szczególnie skupiono się na technologiach

14. Matthews V.O., Noma-Osaghae E., Idiake U.S. (2018*), RFID Enabled Arms and Ammunition Depot Management System with Human Tracking Capacity*, International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 9, Issue 7, 165–171.
15. Marcela G. dos Santos, Darine Ameyed, Fabio Petrillo, Fehmi Jaafar, Mohamed Cheriet *(2020) - Internet of Things Architectures: A Comparative Study.*
16. https://dasoft.com.pl/etykiety-esl-jak-cyfrowe-oznaczenia-polek-rewolucjonizuja-handel-detaliczny/ (acces: 31.03.2026)

AUTOMATED DESIGN AND COMPUTER MODELING OF A STEERING ARM PULLER

Rudyk O., Dumanskyi O., Shapovalov O.
Khmelnytskyi National University, Ukraine

Abstract

SOLIDWORKS is a 3D computer-aided design and engineering analysis system. An add-in of this software, SOLIDWORKS Simulation, uses the geometric model of a part created in SOLIDWORKS to generate a computational model. Integration with SOLIDWORKS makes it possible to minimize operations associated with the specific features of finite element approximation (the finite element method is currently the standard for solving solid mechanics problems using numerical algorithms). Vehicle repair is an objective necessity due technical and economic factors. Therefore, to facilitate vehicle repair processes, enterprises in the automotive transport sector widely use the necessary tools and devices for this purpose—pullers. The design of pullers is characterized by considerable diversity, which is due the wide range of parts to be dismantled, having different geometric shapes, dimensions, and design features. A steering arm puller is a specialized tool used for the safe removal of steering arms and steering joints without damaging the components. The main element of the puller is its body. It operates under conditions of complex resistance to tension and bending, that is, under conditions of eccentric tension. For this reason, it is manufactured with a significant safety margin to prevent deformation during operation. Therefore, the objective of this study was to determine the minimum safety factor of the housing under an applied load of 5200 N. For this purpose, a geometric model of the housing was created in SOLIDWORKS, and the material from which it is made was selected. In SOLIDWORKS Simulation, the fixation (boundary) conditions of the housing were defined and the load was applied; a finite element mesh was generated, along with the corresponding system of algebraic equations. It was established that the minimum safety factor of the housing under an applied load of 5200 N is n_{min} = 6.685, which indicates that the housing is operable. However, the question arises: what load can the housing withstand at a minimum safety factor of n_{min} = 5? The results of the static analysis of the housing model, after repeated calculations in SOLIDWORKS Simulation, showed that in this case the housing can withstand a load of F = 6900 N.

Keywords

Steering arm puller, housing (body), SOLIDWORKS, SOLIDWORKS Simulation, minimum safety factor, load.

Introduction

The use of information and communication technologies in the educational process makes it possible to transition from traditional methods of teaching design to modelling with the help of CAD systems, followed by the application of integrated CAD/CAE automated solutions, one of which is the 3D computer-aided design and engineering analysis system SOLIDWORKS [1, 2, 3, 4]. This design system, based on the parametric geometric kernel Parasolid, was specifically developed for use on personal computers running Windows operating systems. An extension of this software, SOLIDWORKS Simulation, utilizes the geometric model of a part created in SOLIDWORKS to generate a computational (analysis) model [5, 6].

Integration with SOLIDWORKS makes it possible to minimize operations associated with the specific features of finite element approximation (the finite element method is currently the standard for solving solid mechanics problems using numerical algorithms). By varying certain input parameters during numerical simulation, it is possible to track the changes occurring in the model. The main advantage of this method lies in the fact that it allows not only observation but also prediction of experimental results under specific conditions [7].

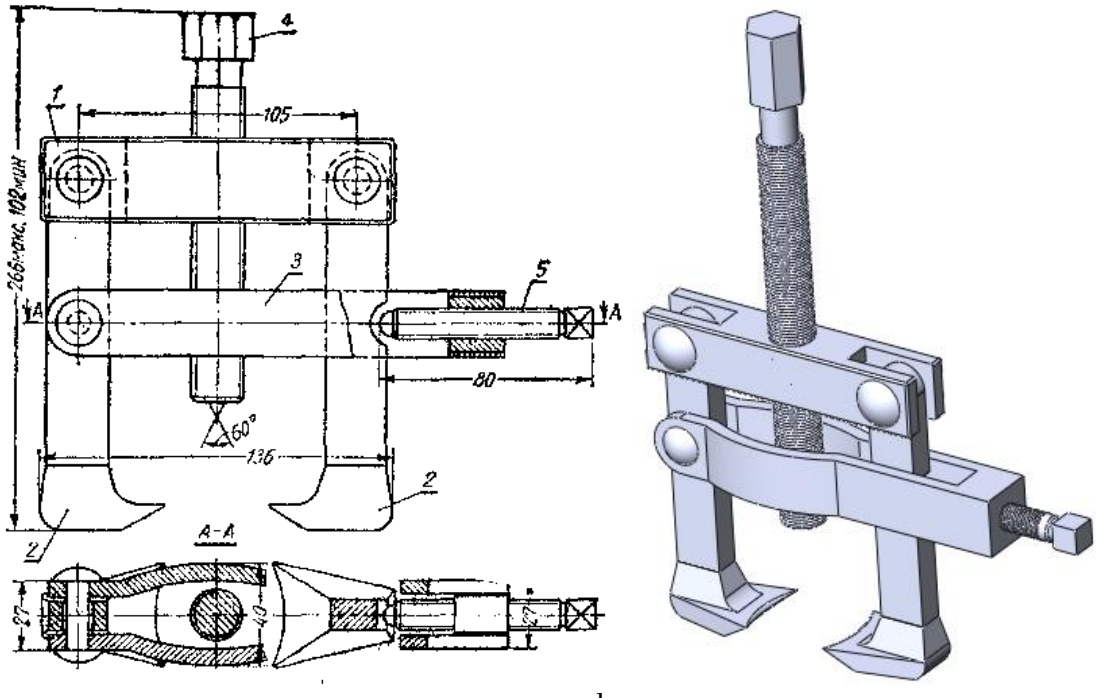
Vehicle repair is an objective necessity due technical and economic factors. First, the needs of the national economy are partially met through the operation of repaired vehicles. Second, repair ensures the continued use of machine components that are not yet fully worn out. Third, repair contributes to material savings used in the production of new vehicles (when restoring parts, metal consumption is 20–30 times lower than in their manufacture).

In addition to threaded connections, during the disassembly of machines it is often necessary to deal with a large number of parts assembled with interference fits. Such parts, remaining stationary for a long time, tend to corrode; as a result, the forces required for their separation significantly exceed the original fitting forces. Therefore, to facilitate vehicle repair processes, enterprises in the automotive transport sector widely use specialized tools and devices for this purpose—pullers [8, 9].

The design of pullers is characterized by significant diversity, which is due to the wide range of parts to be dismantled and having different geometric shapes, dimensions and design features. This leads to the emergence of numerous variants of such devices, each of which is adapted to specific conditions of use and types of connections. At the same time, despite such a variety of design solutions, most pullers share common elements and assemblies that perform identical functions. Often, these components are similar not only in their purpose but also in their shape and operating principle. This standardization ensures design clarity, simplifies the processes of design and manufacturing, and also enhances the efficiency and reliability of pullers in various fields of machine maintenance and repair [10, 11].

Research object and methods

Indeed, the authors [12] used SOLIDWORKS Simulation to perform a strength analysis of one of the components of a universal steering arm puller (Fig. 1) — the clamp. A steering arm puller is a specialized tool designed for the safe removal of steering arms and steering joints without damaging the components. Its design typically includes a strong power screw and a G-shaped clamp, which ensures uniform force distribution. It was established that at a minimum safety factor of n_{min}=5, the maximum force that can be applied to it is 5200 N. Therefore, all subsequent components of the clamp must withstand at least this load.



a b

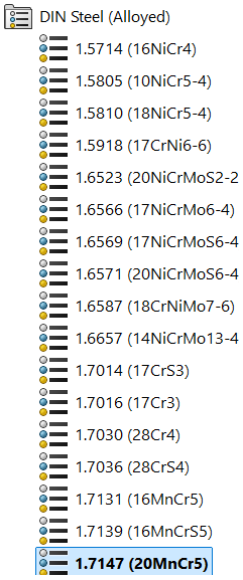
Fig. 1. Universal steering arm puller: a – assembly drawing, b – 3D model

Setting the task

The main element of the puller is its housing. It operates under conditions of complex resistance to tension and bending, that is, under eccentric tensile loading. For this reason, it is manufactured with a significant safety margin to prevent deformation during operation. Therefore, the objective of this study was to determine the minimum safety factor of the housing under an applied force of F = 5200 N.

Results and their discussion

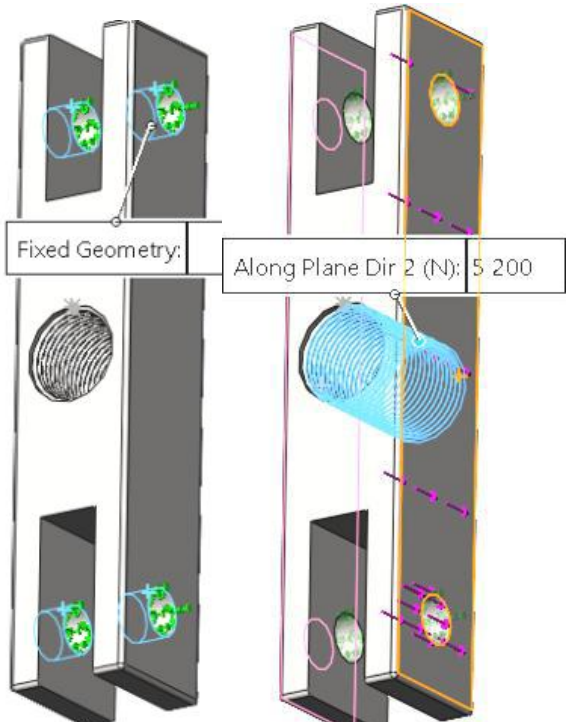
The process begins with creating a geometric model of the housing in SOLIDWORKS. The next step is to select from the SOLIDWORKS material library the material from which it is made — equivalent to steel 18ХГТ according to DSTU 7806:2015 — DIN 1.7147 (20MnCr5) – Fig. 2.



Property	Value	Units
Elastic Modulus	210000.0031	N/mm^2
Poisson's Ratio	0.28	N/A
Shear Modulus	79000	N/mm^2
Mass Density	7800	kg/m^3
Tensile Strength	1100.825984	N/mm^2
Compressive Strength		N/mm^2
Yield Strength	750	N/mm^2
Thermal Expansion Coefficient	1.1e-05	/K
Thermal Conductivity	14	W/(m·K)
Specific Heat	440	J/(kg·K)

Fig. 2. Properties of 18ХГТ steel

For conducting the static analysis of the housing, the SOLIDWORKS Simulation module is applied to its solid model: the fixation points of the housing are defined (Fig. 3, a) and an external load is applied to it (Fig. 3, b).

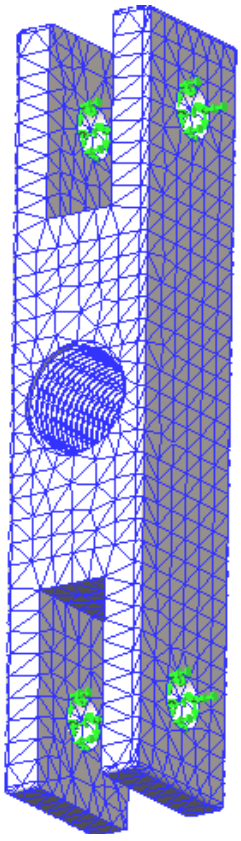


a *b*

Fig. 3. Fixation of the housing (a) and application of an external load to it (b)

Taking into account the connections between the components, SOLIDWORKS Simulation generated algebraic equations that relate the reactions to the material properties of the housing, the boundary conditions, and the applied loads. The finite element analysis software treats the model as a mesh (Fig. 4, a, b).

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points for High quality mesh	4 Points
Element Size	4,01149 mm
Tolerance	0,200574 mm
Mesh Quality	High
Total Nodes	20133
Total Elements	11915
Maximum Aspect Ratio	16,741
% of elements with Aspect Ratio < 3	76,8
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	4,2
Percentage of distorted elements	0,327
Time to complete mesh(hh;mm;ss):	00:00:12
Computer name:	



a *b*

Fig. 4. Mesh parameters of the housing model (a) and its representation on the solid body (b)

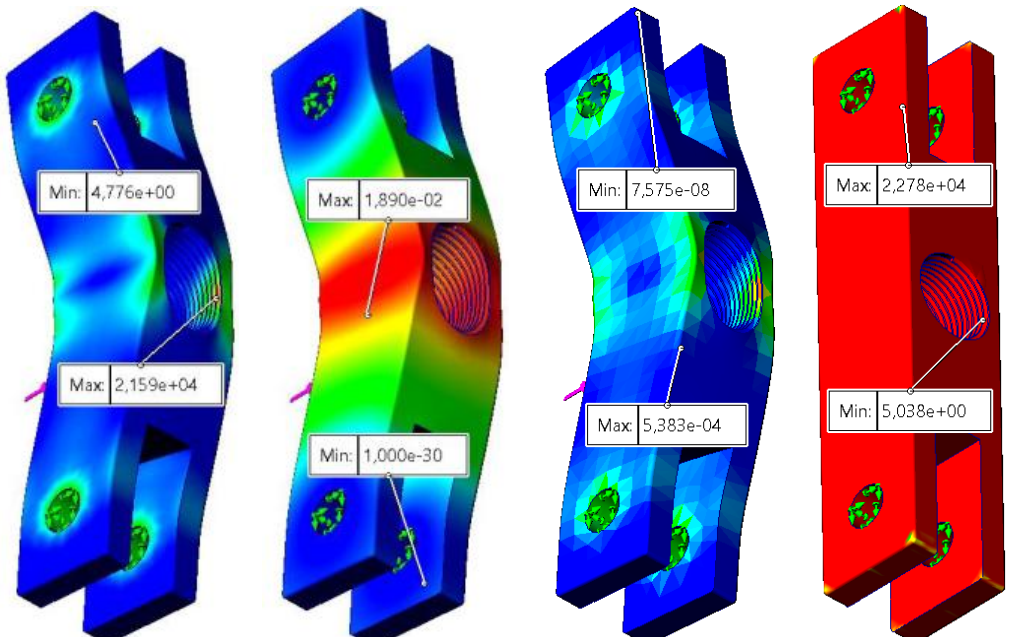
It was determined that the minimum safety factor of the housing under an applied load of 5200 N is n_{min} = (Fig. 5), indicating that the housing is operable.

Name	Type	Min	Max
Margin of safety	Automatic	6,685e+00 Node: 575	3,022e+04 Node: 7372

Fig. 5. Established safety factor (FOS) for the housing

However, the question arises: what load can the housing withstand at a minimum safety factor of n_{min} = 5?

The results of the static analysis of the housing model, after repeated calculations in SOLIDWORKS Simulation, are displayed as a colour gradient, which illustrates the distribution of calculated parameters (Fig. 6): the maximum Von Mises stress is σ = 215.9 MPa (node 575), the maximum resultant displacement is URES = 0.0189 mm (node 2090), and the maximum equivalent strain is ESTRN = 0.0005283 mm (element 4038), all of which do not exceed the allowable limits. In this case, the housing can withstand a load of F = 6900 N.



a *b* *c* *d*

Fig. 6. Diagrams of stresses VON (a), displacements URES (b), equivalent strains ESTRN (c), safety margin FOS (d) of the housing model

Conclusions

Thus, performing engineering calculations ensures the verification of the strength of the housing components and allows their reliability during operation to be justified. At the same time, the use of numerical modelling methods in the educational process significantly expands the possibilities for designing and assigning learning tasks, as well as enhances the efficiency of managing their completion.

By varying individual input parameters during modelling, it is possible to closely monitor how the model's behaviour transforms, evaluate the influence of different factors, and analyse the resulting data. This approach promotes a deeper understanding of the physical processes and underlying principles governing the performance of the structures.

A key advantage of numerical modelling is that it allows not only the visualization of process dynamics but also the prediction of experimental results under specific or non-standard

conditions. This is particularly important in cases where conducting physical experiments is difficult or technically constrained, making digital methods an indispensable tool in modern engineering education and training.

The obtained results of the study confirm its relevance in the context of determining the ultimate capabilities of the investigated housing and assessing its operability under various loading conditions. This demonstrates the appropriateness of the applied approaches and methods, while also highlighting the practical significance of the performed calculations for engineering practice.

Thus, a properly organized and well-managed process of teaching students the methods and tools of machine design promotes increased cognitive activity, stimulating interest in in-depth and creative study of both fundamental and specialized subjects. As a result, this ensures an improvement in their level of training, which positively affects the educational and professional standing of future specialists.

Moreover, the training of specialists who are proficient in the tools of automated design systems and capable of effectively solving applied problems in modern production contributes to the intensification of the educational process. This is particularly relevant today, as education becomes increasingly integrated with real production environments, ensuring the development of practically oriented competencies and enhancing the competitiveness of graduates in the labour market.

At the same time, it is advisable to prioritize software systems that most effectively promote the development of students' intellectual potential and cultivate their ability to apply a reasoned, critical approach amid continuous technological changes. It is important that such tools not only facilitate the mastery of educational material but also stimulate analytical thinking, the ability to make engineering decisions, and adaptability to new technological challenges.

In our view, the integration of information technologies that meet modern global standards into the educational process is an objectively necessary condition for the progressive development of the national education system. This is especially relevant for higher education, where the professional competence of future specialists is formed. Such an approach not only enhances the quality of training but also ensures graduates' competitiveness in the global labour market, promoting the integration of education into the international scientific and technological space.

Literature

1. Rudyk, O.Yu, Dykha, O.V. (2020). SolidWorks as an innovative means for studying the disciplines of automobile profile. "System technologies" 3 (128), 21-35, URL: https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/178/92

2. Rudyk, O.Yu., Mariin, N.S., Yaroshchuk, S.I. (2020). Application of SolidWorks in the educational process. Proceedings of the IV All-Ukrainian scientific-practical Internet conference "Resource-oriented learning in "3D": accessibility, dialogue, dynamics ", incl. N. V. Kononets, V. O. Balyuk, Poltava: KUEP PDAA, 2020, 96-100, URL: http://acup.poltava.ua/wp-content/uploads/2020/02/Збірник-2020-0203.pdf

3. Psol, S., Dykha, O., Rudyk, O., Golenko, K. (2023). Application of computer modeling for road transport calculations. Collection of scientific works of the National Academy of the State Border Service of Ukraine. Series: pedagogical sciences, CE. O. V. Didenko. Khmelnytskyi: NADPSU Publishing House, 1(32), 148-170, URL: https://periodica.nadpsu.edu.ua/index.php/pedzbirnyk/article/view/1322

4. Rudyk O., Dykha O., Golenko K. (2024). Innovative approaches in teaching automotive disciplines. "System Technologies" 2 (151), 144-154, URL: https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/1717/1017

5. Rudyk, O.Yu., Kaplun, P.V. (2020). SolidWorks – CAD/CAE system of technical universities. Science, society, education: topical issues and development prospects. Abstracts of

the 2nd International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kharkiv, 249-253, URL: http://sci-conf.com.ua/ii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferenciya-science-society-education-topical-issues-and-development-prospects-20-21-yanvarya-2020-goda-harkov-ukraina-arhiv/

6. Rudyk O.Yu., Kaplun P.V. (2020). Integration of education, science and business based on the use of SolidWorks API. Integration of Education, Science and Business in the Modern Environment: Winter Debates: abstracts of the 1st International Scientific and Practical Internet Conference, February 6-7 2020. Dnipro: WayScience, P.3, 127-131, URL: http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2020/02/TOM-3-Zbirnik-1-mizhnarodna-nauk-prakt-int.-konf-Winter-Debates-1.pdf

7. Rudyk, O., Kaplun, P., Gonchar, V. (2022). Application of SolidWorks for the training of highly qualified specialists. Current problems in the education system: general secondary education institution – pre-university training – higher education institution: collection of scientific works of the materials of the VIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, February 17, 2022, Kyiv, National Aviation University. Kyiv: NAU, 699-706, URL: https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/APSE/issue/view/879

8. Rudyk O., Rogalsky S. (2017). Computer design and simulation of bearing puller. Automation and computer-integrated technologies in production and education: status, achievements, development prospects: materials of the All-Ukrainian Scientific-Practical Internet Conference. Cherkasy National University, 141-143, URL: https://conference.ikto.net/public/static/about.html

9. Kolisnyk V., Rachok R., Rudyk O. (2019). Research on the performance of a bearing puller. Modern and historical problems of fundamental and applied mathematical training in higher education institutions: the view of higher education students and young scientists. Kharkiv: KhNADU, 173-177, URL: http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/8401

10. Rudyk O., Homich M., Seredyuk V. (2021). Using SolidWorks to calculate of a tractors bearing puller. Achievements and prospects of modern scientific research. Abstracts of the 4th International scientific and practical conference. Editorial EDULCP. Buenos Aires, Argentina, 21-27, URL: https://sci-conf.com.ua/iv-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-achievements-and-prospects-of-modern-scientific-research-7-9-marta-2021-goda-buenos-ajres-argentina-arhiv/

11. Rudyk O., Kaplun P., Solovyov R. (2021). Using of SolidWorks for simulation of screw puller of bearings. World science: problems, prospects and innovations. Abstracts of the 5th International scientific and practical conference. Perfect Publishing. Toronto, Canada, 185-191, URL: https://sci-conf.com.ua/v-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-world-science-problems-prospects-and-innovations-27-29-yanvarya-2021-goda-toronto-kanada-arhiv/

12. Kolisnyk V., Rachok R., Rudyk O. (2019). Research on the performance of a bearing puller. Modern and historical problems of fundamental and applied mathematical training in higher education institutions: the view of higher education students and young scientists. Kharkiv: KhNADU, 173-177, URL: URL: http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/10223

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ В SOLIDWORKS

Одошевський О.
Мукачівський державний університет, Україна

Анотація

Стрімкий розвиток у світі цифрового виробництва передбачає активне застосування систем автоматизованого проектування (САПР) на всіх етапах життєвого циклу виробу, що значно підвищує ефективність виробничих процесів. Найголовнішим завданням сучасних підприємств є раціональне використання людських, фінансових та часових ресурсів для забезпечення максимальної якості фінального продукту, що впливає на позитивний імідж компанії та її конкурентоспроможність на сучасному ринку.

ЕКОНОМІЧНІ ВИКЛИКИ ТА УПРАВЛІНСЬКІ ІННОВАЦІЇ В ІНЖЕНЕРІЇ, ТЕХНОЛОГІЯХ І ТРАНСПОРТІ/ ECONOMIC CHALLENGES AND MANAGERIAL INNOVATIONS IN ENGINEERING, TECHNOLOGY AND TRANSPORT

EFFICIENCY ANALYSIS AND DEVELOPMENT STRATEGIES FOR URBAN PASSENGER TRANSPORT IN KHMELNYTSKYI

Shapovalov O., Posonskiy S., Babak O.
Khmelnytskyi National University, Ukraine

Abstract

The paper examines the current state of urban passenger transport in the city of Khmelnytskyi and identifies the main factors affecting its operational efficiency. An analysis of the transport network, the technical condition of the rolling stock, staffing, and organizational and economic conditions has been carried out. An integrated model for evaluating transport efficiency is proposed, and a numerical analysis for different types of transport is performed. The main directions for improving efficiency are substantiated, including route network optimization, digitalization of management, renewal of rolling stock, and infrastructure development.

Keywords

Urban passenger transport, transport efficiency, transport system, route optimization, public transport, Khmelnytskyi.

Introduction

Urban passenger transport is a key component of a modern city, ensuring population mobility and access to social and economic infrastructure. The efficiency of the transport system directly affects quality of life, environmental conditions, and the competitiveness of the urban environment.

In the context of increasing motorization, urbanization, and limited financial resources, improving the efficiency of public transport becomes particularly relevant, especially in medium-sized cities of Ukraine. The city of Khmelnytskyi is characterized by a mixed transport system that includes bus and trolleybus services; however, its operation is complicated by a number of systemic problems.

Thus, there is a need for a comprehensive study of transport system efficiency and the development of modern approaches to its modernization.

Research object and methods

The object of the study is the urban passenger transport system of the city of Khmelnytskyi.

The following research methods were used:

- system analysis of the transport network;
- statistical analysis of technical and operational indicators;
- methods of mathematical modeling of efficiency;
- comparative analysis of different types of transport;
- scenario forecasting of transport system development.

The information base of the study includes official data from the city council, transport development programs, and results of modern scientific research.

Setting the task

The aim of the study is to improve the efficiency of the urban passenger transport system in the city of Khmelnytskyi.

To achieve this goal, the following tasks were defined:

1. to form a system of efficiency indicators;
2. to develop an integrated efficiency index;
3. to analyze technical and operational characteristics of different transport types;

4. to identify the main factors affecting transport efficiency;

5. to substantiate directions for improving the efficiency of the transport system.

Results and their discussion

The efficiency of the urban transport system is considered as an integrated indicator that includes economic, social, technical, and environmental parameters. The main efficiency criteria include: travel speed; service regularity; vehicle occupancy rate; operating costs; energy consumption; level of accessibility; and environmental impact.

Modern studies propose the use of systemic methods for evaluating transport networks, including statistical algorithms for flow monitoring, digital models, and predictive management systems. Such approaches enable real-time assessment of transport system performance and forecasting of load variations [1].

An additional factor influencing efficiency is the density of passenger contacts, which affects not only transport productivity but also the sanitary and epidemiological safety of transportation processes [2].

Thus, the modern concept of efficient urban transport is based on digital management, integration of transport modes, and adaptive route planning.

The main factors affecting transport efficiency in Khmelnytskyi are:

1. Technical condition of rolling stock. Worn-out vehicles are characterized by increased maintenance costs, higher energy consumption, and reduced comfort, which decreases the attractiveness of public transport.

2. Staff shortages. A lack of drivers limits the full utilization of available rolling stock and prevents stable schedule adherence.

3. Route network organization. Uneven distribution of passenger flows and duplication of routes reduce economic efficiency.

4. Motorization of the population. The growth in private vehicle ownership increases congestion and reduces the speed of public transport.

5. Environmental requirements. The need to reduce emissions and transition to environmentally friendly transport requires significant investments.

The main directions for improving the efficiency of urban passenger transport include:

1. Fleet renewal. Priority should be given to the gradual transition to electric transport and energy-efficient large-capacity buses.

2. Route network optimization, including reduction of route duplication, balancing of headways, and consideration of actual passenger flows.

3. Digitalization of management. Implementation of GPS monitoring systems, electronic ticketing, and passenger flow analytics improves planning accuracy.

4. Public transport priority. Dedicated lanes, intelligent traffic signal control, and restrictions on private vehicles in the city center.

5. Improving accessibility. Low-floor vehicles, adapted stops, and barrier-free infrastructure.

6. Economic modernization. Introduction of contractual payment models for transport services, compensation mechanisms, and investment incentives.

The study is based on a systemic approach to transport network functioning and includes: analysis of passenger flow structure; evaluation of technical and economic indicators; mathematical modeling of efficiency; and scenario forecasting.

According to transport development programs and official reports of the city council, approximately 68 units of electric transport and 240 buses are in operation, including 52 large-capacity, 38 medium-capacity, and 150 small-capacity vehicles. A significant portion of the rolling stock has exceeded its service life. At the same time, the share of large-capacity buses is increasing; about 100 such buses are currently operating in the city. The number of minibuses has decreased by more than 150 units [3].

The conducted analysis of the urban passenger transport system in Khmelnytskyi showed that it has a mixed structure, including trolleybus and bus transport of different capacities. At the

same time, its efficiency is shaped by a set of interrelated technical, organizational, and economic factors.

1. Analysis of Transport System Structure.

According to available data, the city operates about 68 units of electric transport and approximately 240 buses of various capacities. At the same time, a gradual transformation of the rolling stock structure is observed: the share of large-capacity buses is increasing; the number of small buses (route taxis) is decreasing; a significant portion of the fleet remains worn-out.

This trend is positive in terms of increasing system capacity but requires additional investments in fleet modernization.

2. Evaluation of Technical and Operational Indicators.

To quantitatively assess efficiency, an integrated indicator was used:

$$E = \frac{QVk_z}{CT}, \quad (1)$$

where: Q – passenger capacity; V – average speed; k_z – load factor; C – operating costs; T – headway.

The efficiency of the transport system functioning is proposed to be evaluated using groups of indicators presented in table 1.

Table 1. Technical and Operational Characteristics.

Type of Transport	Passenger Capacity	Speed, km/h	Load Factor	Operating Costs, UAH/km	Headway, min
Trolleybus	90	18	0,65	32	10
Large Bus	100	22	0,70	38	12
Small Bus	25	24	0,55	20	8

The calculations showed: trolleybuses – 3.29; large-capacity buses – 3.38; small buses – 2.06.

The results indicate that large-capacity buses are the most efficient, due to the optimal balance between capacity and speed. Trolleybuses demonstrate slightly lower efficiency due to route inflexibility and dependence on overhead lines, but they have environmental advantages.

Small buses are the least efficient due to low capacity and high unit operating costs.

3. Analysis of Factors Affecting Efficiency.

It has been established that transport system efficiency is sensitive to changes in key parameters:

- Speed: an increase of 10–15% leads to efficiency growth of 8–12%;
- Headway: reducing intervals by 2–3 minutes increases attractiveness and ridership;
- Load factor: the optimal range is 0,65–0,75;
- Operating costs: the most significant factor affecting economic efficiency.

Thus, even minor parameter optimization can significantly improve overall efficiency.

4. Scenario Analysis of Transport System Development.

Scenario 1 – Fleet Renewal.

Replacement of 30% of outdated vehicles with energy-efficient ones: cost reduction by 10–15%; efficiency increase by 12–18%.

Scenario 2 – Route Network Optimization.

Elimination of route duplication and balancing of passenger flows: improved load factor; reduced inefficient trips; efficiency increase by 10–14%.

Scenario 3 – Digitalization of Management.

Implementation of GPS monitoring, e-ticketing, and passenger flow analytics: improved schedule adherence; reduced idle time; efficiency increase by 8–12%.

Scenario 4 – Comprehensive Modernization.

Combination of all measures: overall efficiency increase by 25–35%;

5. Environmental and Social Effects.

Transition to electric transport and large-capacity buses allows: reduction of emissions by 20–30%; lower noise levels; improved passenger comfort.

Social effects include: improved accessibility for people with reduced mobility; reduced travel time; increased passenger satisfaction.

6. Generalization of Results.

The results confirm that urban transport efficiency is a multifactorial indicator requiring a systemic management approach.

The most influential factors are: rolling stock structure; route network organization; level of digitalization; economic conditions of operation.

The comprehensive implementation of proposed measures ensures not only efficiency improvement but also sustainable development of the urban transport system.

Conclusions

The study found that the efficiency of urban passenger transport is determined by a combination of technical, organizational, and socio-economic factors. The main problems include worn-out rolling stock, staff shortages, inefficient route networks, and increasing motorization.

The proposed integrated efficiency model allows for a comprehensive assessment of transport system performance and identification of priority areas for modernization.

Improving efficiency is possible through systematic measures, including fleet renewal, digitalization of management, route optimization, and infrastructure development. The implementation of these measures will contribute to the sustainable development of the transport system and improve the quality of life of the population.

Literature

1. Hajdu L., Pavlović J., Krész M., Bóta A. (2025) *Epidemics on the Move: How Public Transport Demand and Capacity Shape Disease Spread.* DOI:10.48550/arXiv.2501.16004

2. Polishchuk O. D., Yadzhak M. S. (2022) *Optimization of interactive evaluation of operation efficiency of the city's transport system by methods of U-statistics*. ArXiv: 2212. 14560 [physics.soc-ph]. URL:https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.14560 (date of application 31.03.2026).

3. Програма розвитку та вдосконалення міського та приміського пасажирського транспорту Хмельницької міської територіальної громади на 2024–2028 роки. URL: https://khm.gov.ua/uk/node/67436 (дата звернення 31.03.2026).

ZARZĄDZANIE RYZYKIEM TRANSPORTU OGNIW LITOWO-JONOWYCH JAKO WYZWANIE EKONOMICZNE I TECHNOLOGICZNE W TRANSPORCIE LOTNICZYM

Bezuch Krzysztof, Kaczor Michał, Zych Natalia
Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie

Streszczenie

Artykuł podejmuje kompleksową analizę zagrożeń oraz wyzwań związanych z transportem lotniczym ogniw litowo-jonowych (Li-ion), integrując perspektywę fizykochemiczną, operacyjną, ekonomiczną oraz prawno-logistyczną. Choć wysoka gęstość energii czyni technologię Li-ion fundamentem współczesnej elektroniki i e-mobilności, jej metastabilny charakter generuje krytyczne ryzyko w specyficznym środowisku lotniczym. W pracy szczegółowo omówiono architekturę ogniwa oraz czteroetapowy mechanizm zjawiska ucieczki termicznej (thermal runaway). Wykazano, że egzotermiczny rozkład katody połączony z uwalnianiem tlenu de facto uniemożliwia skuteczne ugaszenie pożaru za pomocą standardowych lotniczych systemów pokładowych opartych na halonie 1301.