MATERIALE DE FRECARE ECOLOGICE PENTRU SISTEME DE FRÂNARE AUTO SUSTENABILE

BIO-BASED BRAKE FRICTION MATERIALS FOR SUSTAINABLE AUTOMOTIVE SYSTEMS

Maxim GRIGORIU,
Specialitatea Ing. și Manag. în Constr. de Mașini (Automotive), gr. IMCM 2201,
Coordonator științific: **Marina BUNEA**, dr. șt. tehn., conf. univ.,
Centrul Universitar „Bogdan Petriceicu Hasdeu” din Cahul
al Universității Tehnice a Moldovei

Rezumat: *Lucrarea analizează materialele de frecare utilizate pentru plăcuțele de frână, în contextul necesității reducerii impactului asupra mediului generat de transportul rutier. Materialele convenționale conțin metale grele, precum cuprul, antimoniul și plumbul, care, în urma uzurii, contribuie la emisiile de particule din surse non-exhaust și la poluarea mediului.*

Scopul lucrării constă în evaluarea materialelor de origine biologică, precum fibrele naturale și biopolimerii, ca alternative sustenabile pentru materialele tradiționale. Metodologia se bazează pe analiza literaturii de specialitate și pe studiul comparativ al proprietăților tribologice, în special a coeficientului de frecare, a rezistenței la uzură și a comportamentului termic.

Rezultatele analizei au arătat că materialele de origine biologică pot atinge performanțe apropiate de cele convenționale în condiții normale de funcționare și oferă avantaje importante din punct de vedere ecologic.

Cuvinte-cheie: *materiale de fricțiune, plăcuțe de frână, materiale de origine biologică, coeficient de frecare, uzură, sustenabilitate*

Abstract: *This work analyzes friction materials used in brake pads in the context of reducing the environmental impact generated by road transport. Conventional brake materials contain heavy metals such as copper, antimony, and lead, which, through wear processes, contribute to non-exhaust particle emissions and environmental pollution.*

The aim of this study is to evaluate de origine biologică materials, such as natural fibers and biopolymers, as sustainable alternatives to traditional friction materials. The methodology is based on a review of specialized literature and a comparative analysis of tribological properties, particularly the friction coefficient, wear resistance, and thermal behavior.

The analysis results have presented that the bio-based materials can achieve performance levels comparable to conventional materials under normal operating conditions, while offering significant environmental advantages.

Keywords: *friction materials, brake pads, bio-based materials, friction coefficient, wear, sustainability*

Industria automobilelor se află într-un proces continuu de transformare, determinat de necesitatea reducerii impactului asupra mediului și de creșterea eficienței energetice a vehiculelor. În acest context, atenția cercetătorilor nu se mai concentrează exclusiv asupra sistemelor de propulsie, ci și asupra componentelor auxiliare ale autovehiculelor, inclusiv sistemul de frânare. Deși acesta are rolul fundamental de a asigura siguranța circulației prin reducerea vitezei și oprirea vehiculului, studiile recente arată că sistemele de frânare

contribuie semnificativ la emisiile de particule provenite din surse non-exhaust [7, 10, 13].

Plăcuțele de frână utilizate în mod tradițional sunt realizate din materiale compozite complexe care conțin metale grele și compuși anorganici, precum cuprul (Cu), antimoniul (Sb) și plumbul (Pb). Aceste materiale sunt preferate datorită proprietăților lor tribologice favorabile, asigurând un coeficient de frecare stabil și o rezistență ridicată la uzură în condiții variate de funcționare [2, 4, 5]. Cu toate acestea, în timpul procesului de frânare, uzura materialelor conduce la eliberarea de particule fine în atmosferă, contribuind la poluarea aerului și la contaminarea ecosistemelor urbane [7, 13].

Pe fondul acestor preocupări, dezvoltarea materialelor de frecare ecologice, cunoscute sub denumirea de materiale de origine biologică, a devenit o direcție importantă de cercetare în domeniul ingineriei auto. Aceste materiale utilizează resurse regenerabile, precum fibrele naturale (in, cânepă, bambus) și biopolimerii, având ca scop reducerea impactului asupra mediului fără a compromite performanțele funcționale ale sistemului de frânare. Studiile arată că integrarea fibrelor naturale în compoziția materialelor de fricțiune poate îmbunătăți anumite proprietăți mecanice și poate contribui la reducerea masei componentelor [1, 9, 11, 12].

Un aspect esențial în proiectarea materialelor de frânare îl reprezintă comportamentul tribologic, în special menținerea unui coeficient de frecare stabil și a unei rezistențe adecvate la uzură. Aceste proprietăți sunt influențate de compoziția materialului, de temperatura de funcționare și de condițiile de solicitare mecanică, fiind esențiale pentru siguranța și eficiența sistemului de frânare [2, 3, 8, 10]. În cazul materialelor de origine biologică, provocarea principală constă în atingerea unor performanțe comparabile cu cele ale materialelor convenționale, în condițiile unor solicitări termice și mecanice ridicate [1, 11, 12].

Coeficientul de frecare trebuie să se mențină într-un interval optim, de regulă între 0,35 și 0,45, pentru a asigura un compromis între eficiența frânării și stabilitatea vehiculului. O valoare prea mică a acestuia conduce la distanțe mari de frânare, în timp ce o valoare prea mare poate determina blocarea roților și pierderea controlului asupra direcției [10].

Materialele de frecare pentru plăcuțele de frână pot fi clasificate în funcție de compoziție și performanță. Materialele semi-metalice conțin un procent semnificativ de metale, precum fierul sau cuprul, și sunt caracterizate printr-o bună conductivitate termică și o rezistență ridicată la uzură, însă pot genera zgomot și uzură accentuată a discurilor. Materialele organice, cunoscute și sub denumirea de NAO (Non-Asbestos Organic), sunt realizate în principal din fibre organice și rășini, oferind un nivel redus de zgomot și un confort sporit, dar având o rezistență mai scăzută la temperaturi ridicate. Materialele ceramice reprezintă o categorie modernă, caracterizată prin stabilitate termică ridicată și emisii reduse de particule, fiind utilizate frecvent în aplicații de performanță [2, 4, 10].

Un alt aspect esențial în funcționarea materialelor de frecare îl reprezintă comportamentul acestora la temperaturi ridicate. În timpul frânării, temperatura la nivelul suprafețelor de contact poate depăși valori de 300–500°C, în funcție de condițiile de exploatare. În aceste condiții, materialele trebuie să își păstreze proprietățile tribologice și să nu sufere degradări semnificative, cum ar fi pierderea coeficientului de frecare (fenomen cunoscut sub denumirea de „fade”) sau deteriorarea structurală [3, 8, 10].

Durata de viață a plăcuțelor de frână este influențată foarte mult și de uzură. Tipurile principale de uzură întâlnite în sistemele de frânare sunt uzura abrazivă, cauzată de particule dure, și uzura adezivă, rezultată din interacțiunea directă dintre suprafețe [3, 8].

Cu toate acestea, în contextul actual, materialele de frecare sunt analizate nu doar din perspectiva performanțelor tehnice, ci și din punct de vedere al impactului asupra mediului. Materialele tradiționale conțin substanțe care pot genera emisii poluante în timpul utilizării, ceea ce a condus la dezvoltarea unor alternative mai sustenabile [5, 7, 13]. Astfel, materialele

de origine biologică reprezintă o soluție promițătoare, însă necesită o optimizare atentă pentru a îndeplini cerințele stricte impuse de sistemele de frânare moderne [1, 11, 12].

Materialele ecologice includ fibre naturale precum inul, cânepa, bambusul sau coaja de nucă de cocos, utilizate ca elemente de întărire în compozite. Studiile experimentale au demonstrat că aceste fibrele naturale pot îmbunătăți proprietățile mecanice și pot contribui la stabilitatea coeficientului de frecare, în anumite condiții de exploatare [1, 9, 11, 12]. De asemenea, utilizarea biopolimerilor ca matrice de legătură permite reducerea dependenței de materiale sintetice și contribuie la scăderea amprentei de carbon [11, 12].

Cu toate acestea, implementarea materialelor de origine biologică în aplicații reale este încă limitată de o serie de provocări tehnice [1, 11, 12]. Fibrele naturale prezintă o variabilitate ridicată a proprietăților, fiind influențate de factori precum umiditatea, temperatura și condițiile de procesare [1, 9, 11]. De asemenea, stabilitatea termică a acestor materiale este inferioară în comparație cu cea a materialelor convenționale, ceea ce poate conduce la degradarea acestora în condiții de frânare intensă [1, 11, 12]. În plus, compatibilitatea dintre fibrele naturale și matricea polimerică necesită optimizare pentru a asigura o distribuție uniformă a eforturilor și o durabilitate adecvată [1, 9, 11].

Cercetările recente s-au concentrat pe dezvoltarea unor compozite hibride, care combină materiale tradiționale cu materiale de origine biologică, în scopul obținerii unui echilibru între performanță și sustenabilitate [1, 11, 12]. Prin utilizarea unor proporții optime de fibre naturale și aditivi minerali sau sintetici, se pot obține materiale care îndeplinesc cerințele stricte ale sistemelor de frânare moderne. [1,2,12] În paralel, se dezvoltă metode avansate de testare tribologică și simulare numerică, care permit evaluarea comportamentului materialelor în condiții apropiate de cele reale de exploatare [2, 3, 8].

Studiile experimentale din literatura de specialitate indică faptul că materialele de origine biologică pot atinge valori comparabile cu cele ale materialelor convenționale, însă stabilitatea acestora în condiții variate de temperatură rămâne o provocare [1, 11, 12].

Aceste materiale prezintă o rată de uzură mai ridicată comparativ cu materialele semi-metalice, datorită structurii fibrelor naturale și a sensibilității acestora la temperaturi ridicate. Cu toate acestea, prin optimizarea compoziției și utilizarea unor aditivi adecvați, este posibilă reducerea uzurii și îmbunătățirea duratei de viață a materialului [1, 2, 6, 12].

În timpul funcționării, temperaturile la nivelul suprafețelor de contact pot atinge valori ridicate, ceea ce poate conduce la degradarea componentelor organice din material [3, 8, 10]. Fibrele naturale au o stabilitate termică mai redusă comparativ cu fibrele sintetice sau metalice, însă acest dezavantaj poate fi compensat prin utilizarea unor matrice polimerice rezistente la temperaturi înalte și a unor aditivi care îmbunătățesc disiparea căldurii [1, 11, 12].

Evaluarea performanțelor materialelor de origine biologică a fost realizată pe baza analizei comparative a datelor experimentale disponibile în literatura de specialitate, fiind analizate principalele proprietăți tribologice, precum coeficientul de frecare, rezistența la uzură și comportamentul termic (tabelul 1).

Se poate observa că în cazul materialelor semi-metalice, coeficientul de frecare este stabil și rezistența la uzură este ridicată, însă acestea prezintă dezavantaje semnificative în ceea ce privește impactul asupra mediului și emisiile de particule. În schimb, materialele de origine biologică oferă avantajul biodegradabilității și al reducerii conținutului de substanțe toxice, însă necesită optimizări suplimentare pentru a atinge performanțe similare în condiții extreme de exploatare.

Tabelul 1. Parametrii plăcuțelor de frână din materiale compozite semi-metalice și materiale de origine biologică [1, 4-7, 10-13].

Parametru	Material de origine biologică (fibre naturale)	Material semi-metalic
Coeficient de frecare (μ)	0.30 – 0.45 (până la ~0.7 în compozite optimizate)	0.35 – 0.45 (foarte stabil)
Stabilitate coeficient μ	Moderată (scade la temperaturi ridicate)	Ridicată
Rezistență la uzură	Medie	Ridicată
Rata de uzură	~1.5 × 10^{-3} mg/mm (literatură)	Mai mică (≈10^{-3} mg/mm)
Temperatură de funcționare	până la 250–350°C	până la 400–500°C
Conductivitate termică	Scăzută	Ridicată
Fenomen „fade”	Probabil la temperaturi mari	Redus
Masa materialului	Redusă	Mai mare
Zgomot și vibrații	Reduse	Mai ridicate
Emisii de particule	Reduse	Ridicate
Impact asupra mediului	Scăzut (biodegradabil)	Ridicat (metale grele)
Cost materie primă	Scăzut	Mediu – ridicat

Se observă că materialele de origine biologică prezintă limitări în ceea ce privește stabilitatea termică și rezistența la uzură, comparativ cu materialele semi-metalice, dar reprezintă masă redusă, ceea ce contribuie la scăderea masei totale a vehiculului și, implicit, la reducerea consumului de combustibil și a emisiilor de CO_2 [1, 11]. De asemenea, utilizarea resurselor regenerabile contribuie la dezvoltarea unor soluții sustenabile și la reducerea dependenței de materii prime limitate [11,12].

Din punct de vedere economic, materialele de origine biologică pot deveni competitive pe termen lung, în special în contextul creșterii costurilor asociate materialelor tradiționale și al reglementărilor stricte privind protecția mediului. Costurile inițiale de dezvoltare și implementare pot fi mai ridicate, însă acestea pot fi compensate prin avantajele legate de sustenabilitate și conformitate legislativă [5, 11, 12].

Astfel, alegerea materialului optim pentru plăcuțele de frână presupune realizarea unui compromis între performanța tribologică și impactul asupra mediului [2, 3]. În timp ce materialele convenționale oferă performanțe superioare în condiții extreme, materialele de origine biologică reprezintă o soluție promițătoare pentru aplicații în care sustenabilitatea și reducerea emisiilor sunt prioritare [1, 11, 12].

În concluzie, lucrarea demonstrează că materialele de origine biologică reprezintă o alternativă promițătoare pentru viitorul sistemelor de frânare auto, însă implementarea pe scară largă a acestora necesită continuarea cercetărilor și optimizarea performanțelor. Integrarea acestor materiale în industria auto contribuie la dezvoltarea unor sisteme mai eficiente, mai sigure și mai prietenoase cu mediul, în concordanță cu principiile dezvoltării durabile.

Mulțumiri: Această lucrare a fost realizată cu sprijinul proiectului nr. 24159 – AI-InnoScEnCE – AI-Empowered Innovation in Natural Science and Engineering for the Circular Economy, finanțat de Uniunea Europeană și Institutul European de Inovare și Tehnologie (EIT) prin inițiativa EIT HEI (Higher Education Initiative), în cadrul programului Horizon Europe.

Bibliografie:

1. Ammar, Z., et al. (2024). *Development and characterization of date palm fiber-based brake friction composites*. Scientific Reports.
2. Blau, P. J. (2001). *Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives*.
3. Blau, P. J. (2009). *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications*. CRC Press.
4. Chan, D., & Stachowiak, G. W. (2004). *A review of automotive brake friction materials*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering
5. California State Legislature (2010). SB 346 – Brake Pad Regulations (Copper Reduction Law). https://dtsc.ca.gov/scp/limiting-copper-in-brake-pads/ (Accesat 03.04.2026)
6. Devoor, N. S., et al. (2018). *Wear behaviour of brake pad material using organic-based composite materials*.
7. European Environment Agency (2022). *Non-exhaust emissions from road transport*. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/emissions-of-air-pollutants-from (Accesat 03.04.2026)
8. Hutchings, I. M., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials* (2nd ed.). Elsevier.
9. Kim, S. J., Kim, K. S., & Jang, H. (2011). *The effects of natural fibers on the tribological properties of brake friction materials*. Composites Part B: Engineering
10. Limpert, R. (2011). *Brake Design and Safety* (3rd ed.). SAE International.
11. Nwankwo, E., et al. (2025). *Bio-based brake pads: A review of natural fillers and their performance characteristics*
12. Singh, T., & Patnaik, A. (2020).*Performance assessment of eco-friendly brake friction materials*. Materials Today: Proceedings, 26, 1979–1984.
13. United States Environmental Protection Agency (2021). *Brake and Tire Wear Emissions*. https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P101CTUW.TXT (Accesat 03.04.2026)