

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat

STUDII ASUPRA MATERIALELOR DE FRICȚIUNE PENTRU PLĂCUȚELE SISTEMULUI DE FRÂNARE AL AUTOVEHICULELOR

Doctorand,

Ing. George BĂLĂȘOIU

Conducător științific,

Prof. univ. dr. ing. habil. Mihaela BUCIUMEANU

Seria 16: Inginerie mecanică Nr. 83

GALAȚI

2024

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat

STUDII ASUPRA MATERIALELOR DE FRICȚIUNE PENTRU PLĂCUȚELE SISTEMULUI DE FRÂNARE AL AUTOVEHICULELOR

Doctorand,

Ing. George BĂLĂȘOIU

Președinte, Academician prof. univ. dr. ing. Eugen-Victor-Cristian RUSU

Conducător științific, Prof. univ. dr. ing. habil. Mihaela BUCIUMEANU

Referenți științifici: Prof. univ. dr. ing. Daniel CONDURACHE
Prof. univ. dr. ing. Gheorghe VOICU
Prof. univ. dr. ing. Leonard DOMNIȘORU

Seria **16**: Inginerie mecanică Nr. 83
GALAȚI

2024

Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul fundamental ȘTIINȚE INGINEREȘTI

- Seria I 1: **Biotehnologii**
- Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**
- Seria I 3: **Inginerie electrică**
- Seria I 4: **Inginerie industrială**
- Seria I 5: **Ingineria materialelor**
- Seria I 6: **Inginerie mecanică**
- Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**
- Seria I 8: **Ingineria sistemelor**
- Seria I 9: **Inginerie și management în agricultură și dezvoltare rurală**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE SOCIALE

- Seria E 1: **Economie**
- Seria E 2: **Management**
- Seria E 3: **Marketing**
- Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**
- Seria SJ: **Drept**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE UMANISTE

- Seria U 1: **Filologie- Engleză**
- Seria U 2: **Filologie- Română**
- Seria U 3: **Istorie**
- Seria U 4: **Filologie - Franceză**

Domeniul fundamental MATEMATICĂ ȘI ȘTIINȚE ALE NATURII

- Seria C: **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE BIOMEDICALE

- Seria M: **Medicină**
- Seria F: **Farmacie**

Mulțumiri

Prezenta teză de doctorat a fost elaborată sub atenta îndrumare a doamnei Prof. univ. dr. ing. habil. Mihaela BUCIUMEANU. Pe această cale aş dori să îmi exprim recunoștința față de dumneaei și să îi mulțumesc pentru tot sprijinul acordat, pentru disponibilitatea de care a dat dovadă, pentru toate sfaturile pe care mi le-a oferit pe parcursul acestor ani de studii, și pentru toate celelalte momente, bune și mai puțin bune, peste care am trecut împreună. Tot odată vreau să mulțumesc necondiționat comisiei de îndrumare, domnului S.L. dr. ing. Valentin Tiberiu AMORȚILĂ, doamnei Conf. dr. ing. Doina BOAZU, și în mod special, unui om deosebit a cărui ajutor și sprijin a fost necondiționat indiferent de situație sau de problemele întâlnite și fără de care nu aş fi reușit să ajung până în acest punct - domnului Conf. dr. ing. Sorin CIORTAN.

Aduc cuvinte de apreciere și mulțumire pentru generozitatea și disponibilitatea sa, Directorului Consiliului pentru Studii Universitare de Doctorat, domnului MC Academician Prof. dr. ing. RUSU Eugen-Victor-Cristian în calitate de președinte al comisiei de susținere publică a tezei de doctorat dar și directorului de departament, domnului Conf. dr. ing. Constantin GEORGESCU.

Mulțumiri vreau să aduc și doamnei Prof. dr. ing. habil. Daniela-Laura BURUIANĂ și doamnei S.L. dr. fiz. Ceoromila Alina Mihaela pentru realizarea analizelor microscopice prezente în cadrul tezei de doctorat dar și domnului Conf. dr. ing. Cristian MUNTENIȚĂ pentru aparatura pusă la dispoziție.

Nu în ultimul rând vreau să mulțumesc soției mele, Georgiana-Diana Bălășoiu, pentru sprijinul acordat, pentru înțelegerea de care a dat dovadă în tot acest timp și pentru iubirea necondiționată pe care mi-o poartă. Vreau să mulțumesc copiilor, Anastasia și Ioachim care deși sunt la o vârstă fragedă au încercat să înțeleagă momentele dificile prin care am trecut pe durata studiilor doctorale.

Vreau să mulțumesc părinților mei și în special tatălui meu, care deși a trecut prin momente dificile în tot acest timp nu a încetat să îmi ofere sprijinul, dar și bunicilor mei care m-au crescut și fără de care nu aş fi fost cine sunt astăzi.

George BĂLĂȘOIU

Cuprins

	Teza	Rezumat
Mulțumiri.....	5	5
Cuprins.....	7	7
Content.....	11	-
Listă cu figuri.....	15	-
Listă cu tabele.....	21	-
Simboluri și abrevieri.....	23	-
Introducere.....	25	11
Tribosistemul plăcuță – disc de frână - factor important al poluării mediului (Motivația și obiectivele studiului).....	25	11
Direcții de cercetare abordate în teza de doctorat.....	28	13
Prezentarea structurii tezei.....	33	-
Introduction.....	35	-
Brake pad – brake disc tribosystem - important factor of environmental pollution (Motivation and objectives of the study).....	35	-
Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor privind materialele de fricțiune utilizate în construcția plăcuțelor de frână.....	39	15
1.1. Scurt istoric.....	39	15
1.2. Aspecte generale privind componentele sistemului de frânare al autovehiculelor.....	40	15
1.3. Materiale utilizate și rolul complexității compoziției chimice asupra performanței tribosistemului plăcuțe – disc de frână.....	45	16
1.3.1. Materiale utilizate pentru fabricarea discurilor de frână.....	45	16
1.3.2. Materiale de fricțiune utilizate pentru plăcuțele de frână.....	47	16
1.4. Caracteristici impuse materialelor de fricțiune.....	55	16
1.4.1. Introducere.....	55	16
1.4.2. Coeficient de frecare.....	55	17
1.4.3. Uzura și mecanisme de uzură specifice.....	57	17
1.4.4. Influența asupra sănătății a particulelor rezultate în timpul procesului de frânare.....	60	18
1.5. Particularități tehnologice privind procesarea materialelor de fricțiune pentru plăcuțe de frână.....	63	20
1.6. Aspecte privind tehnicile de testare și caracterizare a materialelor de fricțiune pentru plăcuțe de frână.....	65	20
1.6.1. Teste de laborator.....	65	20
1.6.2. Teste pe standuri cu role.....	69	21
1.6.3. Teste de drum.....	70	21
1.7. Analiză asupra posibilității de reciclare a materialelor de fricțiune.....	72	21
1.8. Concluzii privind stadiul actual al cercetărilor privind materialele de fricțiune utilizate în construcția plăcuțelor de frână.....	73	21

Capitolul 2. Materiale luate în studiu și aparatura utilizată.....	75	23
2.1. Materiale luate în studiu.....	75	23
2.1.1. Materiale de fricțiune comerciale luate în studiu.....	75	23
2.1.2. Materiale compozite de fricțiune noi.....	75	23
2.1.3. Filtre comerciale utilizate.....	77	23
2.2. Tehnici experimentale și aparatură de cercetare utilizată.....	78	24
2.2.1. Descrierea standului inerțial dezvoltat.....	78	24
2.2.2. Teste tribologice.....	81	24
2.2.3. Teste dinamice cu ajutorul autoturismului.....	84	24
2.2.4. Dezvoltarea echipamentului de presare la cald.....	85	25
2.2.5. Altă aparatură utilizată.....	89	25
2.3. Realizarea probelor.....	91	26
2.3.1. Realizarea probelor din materialele de fricțiune comerciale.....	91	26
2.3.2. Realizarea materialelor compozite de fricțiune noi prin presare la cald.....	95	26
2.3.3. Realizarea probelor din filtru.....	98	27
2.3.4. Contrapiesa utilizată.....	98	27
2.4. Concluzii privind materiale luate în studiu și aparatura utilizată.....	100	27
Capitolul 3. Rezultate experimentale privind comportamentul materialelor de fricțiune comerciale propuse analizei.....	102	29
3.1. Analize micrografice de structură, duritate și porozitate.....	102	29
3.1.1. Analize microstructurale.....	102	29
3.1.2. Teste de duritate și porozitate.....	104	30
3.1.3. Concluzii.....	105	30
3.2. Rezultate privind încercările materialelor pentru plăcuțe de frână pe standul inerțial.....	105	31
3.2.1. Studiu privind încercările materialelor de fricțiune în diferite medii (uscat, umed și cu particule abrazive).....	105	31
3.2.1.1. Condiții de încercare a testelor realizate pe standul inerțial în diferite medii (uscat, umed și cu particule abrazive).....	105	31
3.2.1.2. Rezultate privind încercările materialului de fricțiune în diferite medii (uscat, umed și cu abraziv).....	107	31
3.2.1.3. Caracterizarea suprafețelor uzate (mediu uscat, umed și cu particule abrazive) pe baza microscopiei electronice de baleiaj (SEM).....	114	36
3.2.1.4. Concluzii privind încercările materialelor de fricțiune în diferite medii (uscat, umed și cu particule abrazive).....	118	38
3.2.2. Studiu privind particulele eliminate în timpul frânării și eficiența elementelor de filtrare ale autovehiculelor rutiere.....	118	39
3.2.2.1. Condiții de testare privind analiza particulelor eliminate în timpul frânării și eficiența elementelor de filtrare ale autovehiculelor rutiere.....	118	39
3.2.2.2. Analiza SEM a filtrelor comerciale înainte de testare.....	120	39
3.2.2.3. Rezultate privind densitatea de particule eliminate în timpul frânării și a temperaturii de la suprafața discului de frână.....	121	40
3.2.2.4. Analiza filtrelor după testare pe baza microscopiei electronice de baleiaj (SEM) și a spectroscopiei de raze X cu dispersie de energie (EDAX).....	125	42
3.2.2.5. Concluzii privind încercările de filtrare.....	130	47

3.3 Rezultate privind încercările tribologice.....	131	47
3.3.1. Condiții de încercare privind testele tribologice.....	131	47
3.3.2. Rezultate privind evoluția coeficientului de frecare, temperaturii și a pierderii de masă.....	132	48
3.3.3. Analiza suprafețelor uzate pe baza microscopiei electronice de baleiaj (SEM) și a spectroscopiei de raze X cu dispersie de energie (EDAX).....	137	51
3.3.4. Concluzii privind încercările tribologice.....	140	54
3.4 Rezultate privind încercările dinamice realizate cu ajutorul autoturismului.....	141	55
3.4.1. Condiții de încercare privind încercările dinamice realizate cu ajutorul autoturismului.....	142	55
3.4.2. Rezultate privind analizarea comportamentului termic al sistemului de frânare.....	143	56
3.4.3. Concluzii privind încercările dinamice realizate cu ajutorul autoturismului.....	148	60
Capitolul 4 Rezultate experimentale privind comportamentul noilor materiale compozite de fricțiune dezvoltate în urma procesului de reciclare.....	149	61
4.1. Analize micrografice de structură, duritate și de porozitate.....	149	61
4.1.1. Analize microstructurale.....	149	61
4.1.2. Teste de duritate și porozitate.....	151	63
4.1.3. Condiții de încercare privind testele tribologice pe noile materiale compozite de fricțiune.....	153	64
4.1.4. Rezultate privind teste tribologice pe noile materiale compozite de fricțiune.....	153	64
4.1.5. Analiza suprafețelor uzate pe baza microscopiei electronice de baleiaj (SEM) și a spectroscopiei de raze X cu dispersie de energie (EDAX).....	156	66
4.1.6. Concluzii privind încercările tribologice ale noilor materiale compozite de fricțiune.....	159	68
Capitolul 5. Modelarea cu rețele neuronale a compoziției materialelor de fricțiune utilizate pentru plăcuțele de frână.....	161	70
5.1 Introducere.....	161	70
5.2. Modelul ANN pentru materialele de fricțiune comerciale.....	162	70
5.2.1. Construirea modelului ANN pentru materiale de fricțiune comerciale.....	162	70
5.2.2. Analiza influenței constituenților asupra valorilor de ieșire.....	163	70
5.3. Model ANN pentru noile materiale de fricțiune dezvoltate în cadrul prezentei teze de doctorat.....	165	71
5.3.1. Construirea modelului ANN pentru compoziții noi.....	165	71
5.3.2. Analiza influenței compoziției asupra valorilor de ieșire.....	166	71
5.4. Concluzii.....	168	73
Capitolul 6. Concluzii generale și contribuții originale.....	169	74
6.1. Concluzii generale.....	169	74
6.2. Contribuții originale.....	171	76
6.3. Direcții viitoare de cercetare.....	172	76
Bibliografie.....	177	80
Anexe.....	194	-

Introducere

Tribosistemul plăcuță – disc de frână - factor important al poluării mediului (Motivația și obiectivele studiului)

Problema poluării atmosferice este deosebit de actuală și orice acțiune în acest sens este binevenită. Conform raportului privind calitatea aerului din Europa publicat de către Agenția Europeană de Mediu în anul 2019, peste 70% din populația europeană locuiește în zone aglomerate, unde densitatea populației și activitățile economice conduc la un nivel ridicat de poluare [1]. Un alt raport publicat în anul 2020 relatează faptul că adoptarea măsurilor de izolare și de restricționare a circulației (așa-numitul lockdown) de către majoritatea țărilor europene (în încercarea de a preveni răspândirea și infectarea populației cu virusul SARSCOV-2) a condus la o reducere semnificativă a poluării aerului [2]. Acest lucru demonstrează faptul că mijloacele de transport terestre, aeriene și nautice contribuie în mod activ și continuu la poluarea mediului înconjurător.

Pe baza datelor prezentate în literatura de specialitate există două surse principale de poluare în ceea ce privește industria transporturilor terestre [3,4]: (i) gazele rezultate în urma procesului de ardere a motoarelor cu ardere internă și (ii) emisiile ce rezultă din alte surse.

În ceea ce privește poluarea atmosferică realizată de gazele de evacuare ale autovehiculelor rutiere au fost luate măsuri încă din anul 1992 prin elaborarea unor norme de poluare. În ultimii ani, pe baza normelor de poluare (denumite norme EURO), care caracterizează și limitează cantitatea de noxe eliminate de motoarele cu ardere internă, au fost stabilite valorile limită pentru patru poluanți principali și anume: oxizii de azot (NO_x), monoxidul de carbon (CO), particulele fine (PM) și hidrocarburile nearse (THC și NMHC) [3].

A doua sursă de poluare, denumită de literatura de specialitate Non-Exhaust Emissions (NEE) poate fi privită din două perspective: (i) *emisii directe datorate uzurii* (care se referă la particulele ce rezultă din procesul de frânare și cele care rezultă din contactul pneu – carosabil) și (ii) *emisii rezultate din mediul înconjurător* (praful și particulele deja existente pe suprafața carosabilului). Grigoratos și Martini într-un studiu din 2015 [13] au menționat că aproximativ jumătate din particulele eliminate în aer sunt datorită uzurii și fac parte din categoria PM₁₀, în timp ce cealaltă jumătate reprezintă particule ce sunt depozitate la nivelul carosabilului sau în împrejurimi ori sunt atrase de celelalte autovehicule.

Procesul de frânare se realizează prin frecarea cu alunecare a celor două componente principale ale sistemului de frânare: disc - plăcuțe de frână, în urma căruia, energia cinetică este transformată în căldură [14,15]. În majoritatea cazurilor această frecare cu alunecare se realizează în mediu uscat, dar uneori se poate realiza și în mediu umed. În cadrul acestui proces apare uzura ambelor componente, proces prin intermediul căruia particule mici se desprind de pe suprafața celor două corpuri aflate în contact și în mișcare relativă, ajungând în aer cu precădere în cazul frânării în mediu uscat [16]. Conform literaturii de specialitate, aproximativ 35% din pierderea de masă a unei plăcuțe de frână este eliminată ca și particule în aer. Aproximativ 86% dintre particulele eliminate au o dimensiune mai mică de 10 μm

(PM10), în timp ce aproximativ 63% dintre acestea (PM10) sunt mai mici de 2,5 μm (PM2,5) [17].

Ținând cont de aceste aspecte, se poate spune că industria autovehiculelor rutiere este o importantă sursă de poluare nu numai datorită procesului de fabricare a acestora, dar și prin menținerea lor în circulație pe o perioadă cât mai mare, iar în ultimii ani, într-un număr din ce în ce mai mare.

Marile orașe și capitale ale Uniunii Europene au încercat să limiteze poluarea aerului prin taxarea suplimentară a autovehiculelor ce nu îndeplinesc norme de poluare EURO recente, și chiar prin interzicerea acestora în zonele centrale și de principal interes ale orașelor. În susținerea acestei directive, pe parcursul anului 2023, a fost pusă în dezbatere și propusă spre aprobare o nouă normă (EURO 7) ce limitează la minim cantitatea de poluanți eliminați datorită utilizării autovehiculelor cu motoare cu ardere internă. Totodată a fost pusă în dezbatere și ideea interzicerii fabricării acestora începând cu anul 2035, astfel fiind susținută din ce în ce mai mult ideea utilizării la scară largă a autovehiculelor cu propulsie electrică. Aceste autovehicule emit 0% gaze nocive și promet o revoluție tehnologică în acest sens, beneficiind de o tehnologie ultra modernă ce reduce la minim uzura subansamblelor. Cu toate acestea, sistemele de frânare convenționale nu vor dispărea, ele fiind utilizate în continuare de autovehiculele electrice, dar posibil la o capacitate redusă. Astfel, în cadrul aceleiași norme (EURO 7) a fost pusă în dezbatere și problema poluării cauzată de particulele eliminate în timpul frânării sau a celor rezultate în urma uzurii pneurilor, organele competente venind cu propunerea de a limita cantitatea de particule eliminate de acestea.

Pentru reducerea poluării cu particule provenite în urma procesului de frânare al autovehiculelor este necesară găsirea unor noi soluții de construcție a sistemelor de frânare, dar mai ales dezvoltarea unor noi materiale compozite, atât pentru plăcuțele de frână, cât și pentru discurile de frână, utilizând compuși chimici prietenoși cu mediul înconjurător.

În ideea dezvoltării pe plan mondial a industriei de autovehicule electrice, sistemele de frânare convenționale vor suferi modificări de adaptare pentru îndeplinirea cerințelor impuse de către acestea. Frânarea regenerativă, ce presupune recuperarea de energie electrică prin frânare, este în plină dezvoltare și va echipa cu siguranță vehiculele electrice oferind o autonomie crescută a acumulatorilor. În această situație sistemele de frânare convenționale vor fi utilizate din ce în ce mai puțin în procesul de frânare, acest lucru conducând spre o creștere considerabilă a duratei de viață a plăcuțelor de frână. Acest aspect poate crea dezechilibre economice considerabile în ceea ce privește industria de fabricare a sistemelor de frânare. O propunere pentru evitarea dezechilibrului economico-financiar ar fi o dezvoltare multidirecțională a materialelor de fricțiune pentru plăcuțele de frână, și anume:

I. Dezvoltarea unor materiale organice ce au un grad de poluare foarte scăzut, fără a se pune accent pe durata de viață a acestora, dar care au bune proprietăți tribologice și termice. Astfel, datorită acționării mai rare a sistemelor de frânare pe autoturismele electrice, influența duratei de viață a materialului de fricțiune o să aibă un impact minim, atât asupra utilizatorului, cât și asupra industriei producătoare deoarece autoturismele electrice vor avea intervale de întreținere asemănătoare cu vehiculele convenționale. În acest fel industria producătoare de materiale de fricțiune fiind susținută în continuare pe plan economic.

II. Dezvoltarea unor noi materiale compozite de fricțiune cu proprietăți tribologice excelente, pentru care poluarea cauzată de acestea trece pe un plan secundar, dar nu este neglijată. Acest tip de materiale de fricțiune se vor adresa unor industrii ce utilizează mult mai rar sistemul de frânare (pe durate scurte de timp, dar la intensitate maximă), cum ar fi: industria aeronautică ce utilizează sistemul de frânare foarte intens doar la aterizarea avioanelor sau autovehiculele de competiție ce utilizează sistemul de frânare intens dar doar pe durata desfășurării competițiilor.

În ceea ce privește posibilitatea de reducere a poluării mediului înconjurător, încă din anul 2015 Comisia Europeană (CE) adoptă primul plan de acțiune în vederea implementării economiei circulare. Acest concept implică utilizarea materialelor și a produselor în mod continuu prin reciclarea și re folosirea acestora, ceea ce oferă pe de o parte beneficii pe plan economic, dar susține în același timp și conservarea resurselor naturale pe o perioadă cât mai lungă de timp, reducând poluarea mediului înconjurător [19,20]. În vederea susținerii acestui concept în momentul de față sunt efectuate cercetări multidisciplinare cu un efect major asupra tuturor industriilor. În ceea ce privește industria construcțiilor de mașini și în mod particular industria de automobile, se fac progrese constante privind reciclarea, acest lucru bazându-se în principal pe reciclarea materialelor din care sunt realizate autovehiculele (metal, plastic, etc), dar și pe colectarea deșeurilor periculoase rezultate în urma utilizării motoarelor cu ardere internă (uleiuri, lichid de răcire, agent frigotehnic, etc). După cunoștințele autorului primele mențiuni în literatura de specialitate referitoare la posibilitatea de reciclare a materialelor de fricțiune utilizate la producerea plăcuțelor de frână sunt din anul 1998 [21].

Conform datelor furnizate de Agenția Executivă pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA), în Europa se produc anual aproximativ 150.000 de tone de materiale de fricțiune, care la momentul înlocuirii au o uzură de aproximativ 50%. Acestea sunt eliminate în natură ca și deșeuri periculoase, sau în anumite cazuri sunt reciclate și utilizate în producerea oțelurilor cu o calitate scăzută. Literatura de specialitate prezintă doar câteva studii referitoare la posibilitatea de reciclare a acestor materiale complexe [22,23]. Lyu et al. [22] evidențiază că procesul de reciclare al materialelor de fricțiune are sens doar dacă materialul obținut are aceleași performanțe ca materialul de bază. În acest sens, Rajaei et al. [23] au realizat un material de fricțiune nou utilizând pe post de matrice pulberea obținută în urma procesării mecanice a materialelor de fricțiune uzate. Testele realizate de acesta au demonstrat faptul că materialele obținute prezintă performanțe similare cu ale materialul de referință.

Având în vedere cercetările realizate de către Agenția Executivă pentru Climă, Infrastructură și Mediu și rezultatele preliminare prezentate de literatura de specialitate se poate spune că reciclarea materialelor de fricțiune provenite din plăcuțele de frână ieșite din uz ale autovehiculelor în vederea dezvoltării unor noi materiale compozite este posibilă, iar materialele obținute trebuie să prezinte performanțe similare cu materialele de referință, iar cu mici modificări există posibilitatea de îmbunătățire a acestora.

Direcții de cercetare abordate în teza de doctorat

Direcțiile de cercetare din domeniul materialelor de fricțiune pentru plăcuțele sistemului de frânare al autovehiculelor au evoluat continuu pentru a spori eficacitatea sistemului de frânare, pentru a aborda amenințările în ceea ce privește poluarea și combaterea schimbărilor de mediu prin reciclarea materialelor de fricțiune considerate deșeuri periculoase.

Scopul și obiectivele principale ale prezentei teze de doctorat se bazează pe analiza globală (atât din punct de vedere mecanic, cât și din punct de vedere al poluării) a trei tipuri de plăcuțe de frână frecvent utilizate în România, cu misiunea de a propune noi materiale utilizate la producerea plăcuțelor de frână care să aibă o compoziție chimică bazată pe materiale de fricțiune uzate. Condiția impusă este ca printr-o ușoară modificare a compoziției chimice (adăugarea unor noi componente chimice), cu costuri minime noile materiale propuse să aibă proprietăți cele puțin egale cu materialele inițiale.

Pentru îndeplinirea acestui obiectiv general a fost necesară realizarea următoarelor obiective specifice:

- analiza critică a stadiului actual al cercetărilor privind materialele de fricțiune utilizate în construcția plăcuțelor de frână,
- proiectarea și realizarea și/sau îmbunătățirea unor aparaturi specifice pentru realizarea și caracterizarea globală a materialelor de fricțiune comerciale luate în studiu; pentru ca rezultatele obținute să fie cât mai complexe și să ofere informații globale în vederea propunerii unor materiale de fricțiune noi cu proprietăți îmbunătățite,
- evaluarea comportării materialelor de fricțiune comerciale în diferite condiții pe standul inerțial (mediu uscat și umed, cu particule abrazive),
- extinderea evaluării comportării materialelor de fricțiune comerciale în vederea analizării particulelor eliminate în timpul frânării și eficiența elementelor de filtrare a aerului din cabină ale autovehiculelor rutiere,
- evaluarea comportării tribologice a materialelor de fricțiune comerciale, pentru determinarea coeficientului de frecare (COF) și pentru evidențierea mecanismelor de degradare,
- analiza în mod dinamic a comportamentului termic al materialelor de fricțiune comerciale prin testarea acestora pe autoturism, în diferite condiții de utilizare (regim urban, regim extra-urban, frânări bruște, etc.),
- proiectarea și executarea echipamentului pentru necesar pentru fabricarea materialelor noi de fricțiune prin presare la cald,
- propunerea unei metodologii de realizarea a noilor materiale compozite de fricțiune având la bază materiale de fricțiune uzate,
- evaluarea comportării tribologice a materialelor de fricțiune noi.

Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor privind materialele de fricțiune utilizate în construcția plăcuțelor de frână

1.1. Scurt istoric

Istoria dezvăluie faptul că primele sisteme de frânare foloseau plăcuțe de frână din lemn care erau acționate prin intermediul unui levier, direct pe suprafața de rulare a roții.

Primul automobil dotat cu un sistem de frânare ce folosea o bandă din piele de bovină din mai multe straturi a fost dezvoltat de către Gottlieb Daimler și Carl Benz în jurul anilor 1886 [24].

Primul material de fricțiune care a stat la baza dezvoltării saboților și plăcuțelor de frână actuale a fost inventat de către englezul Herbert Froad în anul 1897 [24,26] acesta fiind cunoscut și ca inventatorul plăcuțelor de frână. În anul 1908 Herbert Froad propune un nou material de fricțiune. Materialul propus era o combinație de azbest crisotil (un material foarte răspândit la acea vreme) și fire de alamă impregnate cu lacuri și rășini cu punct de topire ridicat [32–34]. Cercetările de la sfârșitul anilor 1980 vin cu un rezultat dezamăgitor pentru industria automobilelor, și anume faptul că particulele de azbest eliminate în aer în timpul frânării sunt dăunătoare pentru populație și acesta este interzis [33,36].

Astfel, o rețetă care să respecte multitudinea condițiilor de exploatare și care totodată să respecte și normele de poluare aflate în vigoare (norme care se modifică și acestea constant) încă nu a fost găsită.

1.2. Aspecte generale privind componentele sistemului de frânare al autovehiculelor

Sistemul de frânare este unul dintre cele mai importante elemente de siguranță, acesta fiind alcătuit din mai multe elemente componente care participă activ la procesul de frânare. Fiecare componentă are rolul său bine stabilit, având în mod direct efect asupra performanței sistemului de frânare.

Datorită solicitărilor la care sunt supuse sistemele de frânare și a cerințelor de exploatare, acestea trebuie să îndeplinească următoarele condiții [15,42]:

- decelerații rapide,
- frânare progresivă și fără șocuri,
- să ofere aceleași performanțe în condiții de utilizare variabile,
- efort minim de acționare a sistemului,
- fiabilitate ridicată,
- răspuns rapid în urma acționării,
- construcție simplă și ieftină.

În zilele noastre, industria constructoare de autovehiculelor rutiere, utilizează două tipuri de sisteme de frânare [43,44], și anume: sistem de frânare cu discuri și plăcuțe de frână (sistem de frânare axial) și sistem de frânare cu tamburi și saboți (sistem de frânare radial)

1.3. Materiale utilizate și rolul complexității compoziției chimice asupra performanței tribosistemului plăcuțe – disc de frână

Perechea disc – plăcuțe de frână reprezintă subansamblul sistemului de frânare care participă activ la realizarea procesului de frânare. Din acest motiv materialele din care acestea sunt confecționate au un aport mare în ceea ce privește performanțele sistemului de frânare.

1.3.1. Materiale utilizate pentru fabricarea discurilor de frână

În zilele de astăzi, cele mai utilizate discuri de frână sunt fabricate din fontă cenușie [46]. Cu o rezistență la oboseală termică dar și mecanică ridicată, fonta îndeplinește cel mai bine cerințele impuse discurilor de frână [55]. În general fontele cenușii utilizate la producerea discurilor de frână au un conținut de carbon de maxim 4% și o densitate mare ($7,2 \text{ g/cm}^3$) [60].

Alte materiale menționate în literatură pentru confecționarea discurilor de frână sunt: aliaje de aluminiu și materiale compozite pe bază de aluminiu, aliaje de titan și materiale compozite pe bază de titan, materiale compozite cu matrice de carbon și materiale ceramice și materiale compozite cu matrice ceramică [56].

1.3.2. Materiale de fricțiune utilizate pentru plăcuțele de frână

Materialele utilizate astăzi în producția plăcuțelor de frână sunt un amestec de mai mulți constituenți chimici. Un astfel de material de fricțiune poate conține mai mult de 10 constituenți diferiți, atât din punct de vedere chimic, cât și ca formă și mărime [33,70]. Cercetările efectuate în domeniu și analizele chimice făcute asupra materialelor de fricțiune existente, împart constituenții chimici prezenți în materialele de fricțiune în patru categorii [14,33,60,71–73]: aditivi de fricțiune, fibre de consolidare, materiale de umplutură, lianți.

1.4. Caracteristici impuse materialelor de fricțiune

1.4.1. Introducere

Condițiile impuse din punct de vedere tehnic plăcuțelor de frână sunt următoarele [14,71]:

- a) coeficient de frânare ridicat în timpul contactului cu discul de frână,
- b) construcție simplă și totodată o tehnologie ușoară de obținere, cu costuri cât mai scăzute,
- c) rezistență termică bună și o disipare a căldurii ușoară,
- d) rezistență mecanică ridicată,
- e) uzură redusă.

În momentul de față nu există nici un material de fricțiune care să satisfacă simultan toate condițiile impuse. Producătorii materialelor de fricțiune sunt în căutarea aceluși material de fricțiune care să îndeplinească următoarele condiții esențiale:

- coeficient de frecare mare, dar cât mai stabil într-o gamă de temperaturi cât mai mare [14,125–127],
- rezistență mare la uzură [14,84,127–129],
- eliminarea unei cantități minime de particule în atmosferă [72],
- să aibă un zgomot cât mai redus în timpul frânării [84,127,130].

1.4.2. Coeficient de frecare

Coeficientul de frecare (COF) este un parametru ce poate fi înregistrat cu ajutorul tribometrelor în laborator. Se știe că valoarea COF este influențată de mai mulți factori, dintre care se pot aminti: proprietățile materialelor aflate în contact, rugozitatea suprafețelor în contact, geometria de contact, condițiile de testare (viteza, forța normală de apăsare, etc.), dacă între cele două suprafețe există lubrifianț sau nu, temperatura, etc.

După cum a fost menționat anterior, în cazul tribosistemului material de fricțiune – disc de frână avem nevoie de o valoare mare a COF, dar în același timp acesta trebuie să-și mențină stabilitatea cu timpul. Valorile raportate în literatura de specialitate sunt cuprinse între 0,3 – 0,6 [33].

1.4.3. Uzura și mecanisme de uzură specifice

Dacă în cazul primului parametru tribologic - **coeficient de frecare** (discutat în subsecțiunea anterioară) este de dorit să avem o valoare cât mai mare, în cazul celui de al doilea parametru tribologic important – **uzura** (consecința frecării dintre cele două corpuri în contact) - întotdeauna este de dorit să fie cât mai mică.

Tribosistemul format dintre discul de frână și plăcuța de frână este unul destul de complex, în primul rând datorită componentelor chimice prezente în materialul de fricțiune. Eriksson și Jacobson [55] menționează că principalele dificultăți în înțelegerea proceselor tribologice care apar la interacțiunea dintre plăcuța de frână și discul de frână sunt: compoziția chimică a materialelor de fricțiune, rugozitatea mare a plăcuțelor de frână și diferențele majore între constituenții chimici prezenți în materialul de fricțiune (de exemplu rășina și anumiți lubrifianți solizi pot avea o duritate de aproximativ 200 MPa, iar la cealaltă extremitate se află particulele abrazive sau anumite fibre care pot avea durități de aproximativ 20 GPa). Aceste diferențe duc la urme de uzură neregulate, cu diferite zone, așa numite platouri care se formează pe suprafața de contact a materialului de fricțiune (platouri primare și platouri secundare). Aria reală de contact dintre cele două corpuri este mult mai mică, și cu fiecare ciclu de alunecare aceasta se modifică, iar presiunea de contact o să fie concertată pe aceste platouri (care sunt peste nivelul suprafeței).

În timpul mișcării dintre cele două componente în contact sunt generate particule de uzură, care o parte datorită poziției de funcționare a tribosistemului o să fie eliminate din zona de contact, o parte o să ruleze în zona de contact (ceea ce înseamnă prezența celui de al treilea corp în zona de contact), iar o parte datorită temperaturii o să adere pe suprafața discului (transfer care se poate repeta pe durata de funcționare a tribosistemului – de pe disc pe materialul de fricțiune și invers conducând la formarea unui tribostrat – film de fricțiune [60,154]. Prezența celui de al treilea corp general în contact o să ducă la prezența a două mecanisme tipice de uzură: uzura de abraziune între 3 corpuri și uzura de adeziune [104,117,129,137,143,155]. Ambele mecanisme de uzură se pot întâlni atât pe suprafața materialului de fricțiune, cât și pe suprafața discului. Alte mecanisme de uzură observate în cazul plăcuțelor de frână pe lângă abraziune și adeziune sunt: delaminarea, fragmentarea, uzură de oboseală, etc. [129,143,149,155,163,164].

În cazul discului de frână, mecanismele principale de uzură raportate sunt abraziunea, adeziunea, delaminarea, uzura de oboseală termo-mecanică și tribo-oxidarea [129,149,164].

1.4.4. Influența asupra sănătății a particulelor rezultate în timpul procesului de frânare

În Figura 1.6 este prezentată evoluția numărului de particule eliminate în urma frânării pe categorii de vehicule din anul 2012 până în anul 2019.

Se poate observa clar din Figura 1.6 tendința de creștere a numărului de particule eliminate în timpul frânării pentru perioada analizată pentru mai multe categorii de autovehicule. Numărul total de particule eliminate în timpul frânării este foarte mare, având o valoare ce crește anual direct proporțional cu valoarea particulelor eliminate în timpul frânării în cazul autoturismelor. Acest lucru demonstrează că autoturismele au un impact major în poluarea atmosferică. Dacă ne raportăm la valoarea particulelor eliminate în timpul frânării în cazul camioanelor și în acest caz se observă o creștere pe durata perioadei analizate, dar mai puțin semnificativă în comparație cu cea a autoturismelor. Creșteri nesemnificative au fost observate în cazul autobuzelor și tractoarelor.

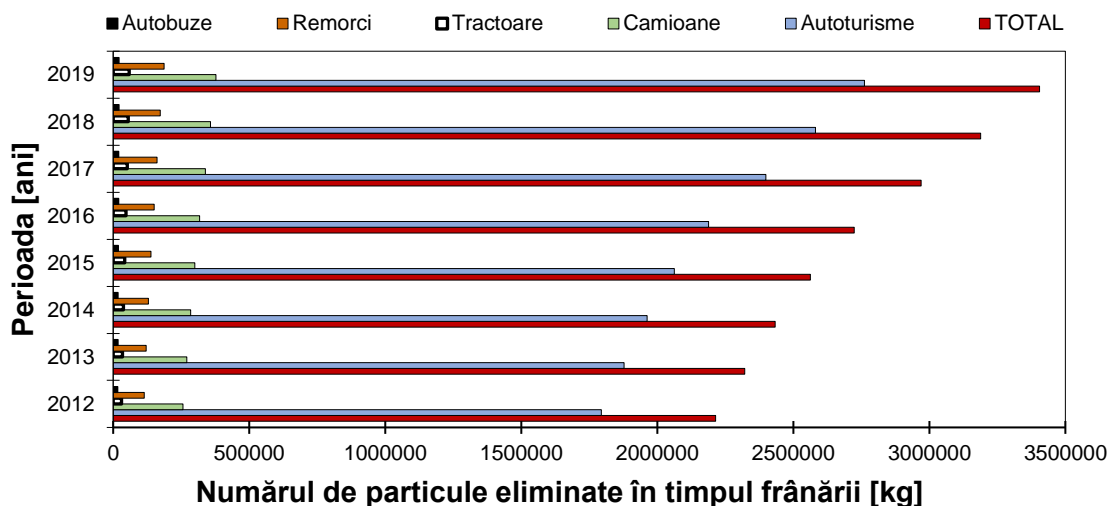


Figura 1.6. Numărul de particule eliminate în urma frânării pe categorii de vehicule [168]

Luând în considerare aceste aspecte au fost analizate persoanele din România care au decedat în urma unor boli pulmonare sau a unor tumori (Figura 1.7). În ceea ce privește numărul persoanelor decedate în urma unor tumori nu se observă o creștere semnificativă a numărului de cazuri în perioada analizată (49000 de cazuri raportate în anul 2012 și 50300 de cazuri în anul 2019), dar în cazul bolilor pulmonare se observă o tendință ușor crescătoare de la 13200 de cazuri declarate în anul 2012 la 17700 de cazuri în anul 2019.

Figura 1.9 reprezintă valorile coeficientului de corelație Pearson obținut în urma corelării celor două variabile (decese datorate bolilor pulmonare și/sau tumori, și cantitatea de particule eliminate în timpul frânării). Se poate observa că valoarea coeficientului de corelație Pearson în cazul numărului total de persoane decedate din România și cantitatea de particule eliminate în timpul frânării în perioada 2012 - 2019 are o valoare maximă în cazul autobuzelor și anume $r = 0,77$, în timp ce valoarea minimă a fost obținută în cazul autoturismelor ($r = 0,67$). Ambele valori indică o corelație mare între cele două variabile, adică între cantitatea de particule rezultate din frânarea autovehiculelor și decesele cauzate de bolilor pulmonare și tumori.

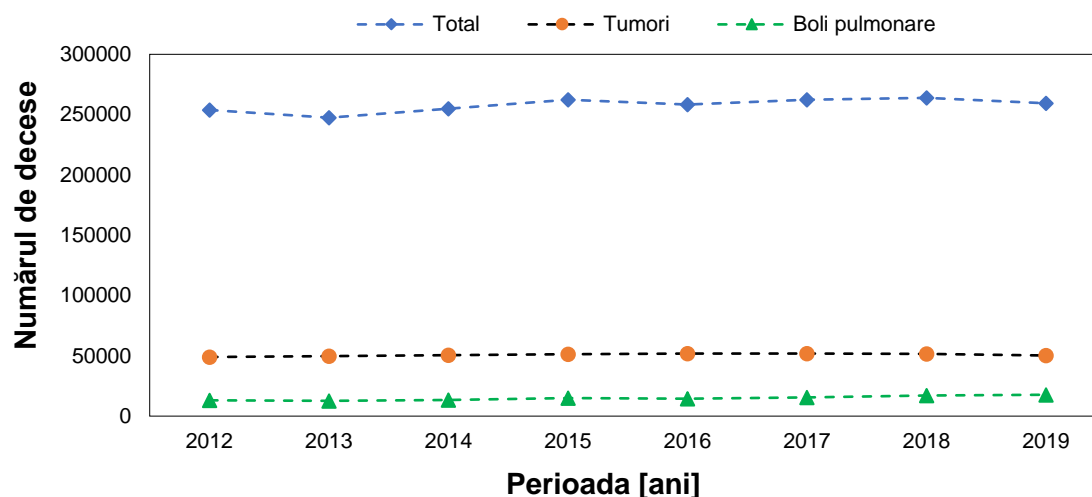


Figura 1.7. Evoluția numărului de decese a persoanelor din România în perioada 2012 - 2019 [168]

În cazul valorilor obținute pentru coeficientul de corelație Pearson dintre numărul persoanelor decedate din România datorită unor tumori și cantitatea de particule eliminate în timpul frânării în perioada 2012 – 2019 se observă o valoare maximă în cazul tractoarelor și a de autobuzelor (aproximativ $r = 0,64$). Valoarea minimă a corelației a fost obținută tot în cazul autoturismelor $r = 0,50$. Această valoare indică o corelație mai slabă între decesele cauzate de tumori și cantitatea de particule rezultate din frânarea autovehiculelor.

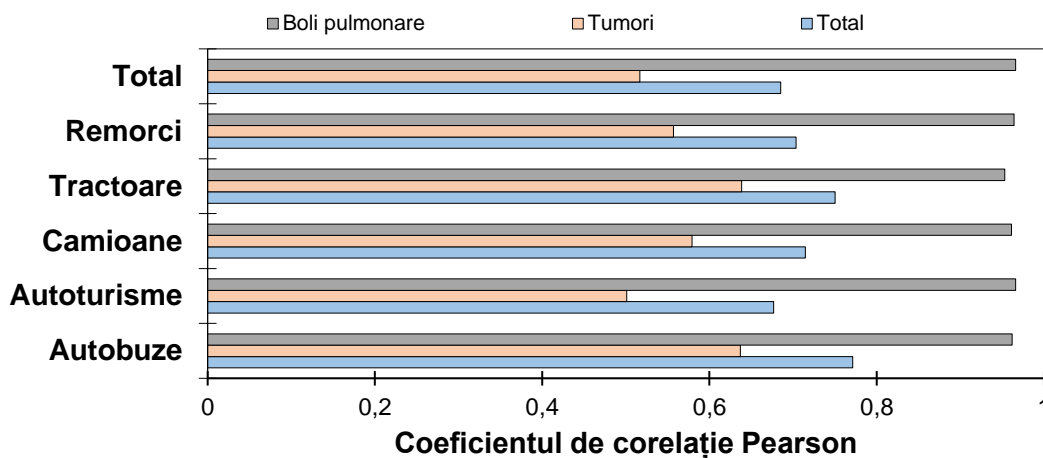


Figura 1.9. Valoarea coeficientului de corelație Pearson dintre numărul persoanelor decedate din România și cantitatea de particule eliminate în timpul frânării în perioada 2012–2019 [168]

Valoarea maximă a coeficientului de corelație Pearson ($r = 0,96$) obținută în cazul persoanelor decedate din România datorită unor boli pulmonare și cantitatea de particule eliminate în timpul frânării de către autoturisme, indică o asociere semnificativă statistic între nivelul de pulberi în suspensie din aerul ambiant și incidența îmbolnăvirilor cauzatoare de deces în cazul bolilor pulmonare.

Această corelație ridică un semn de întrebare asupra calității aerului respirat din zonele urbane din România. Chiar dacă cercetările în domeniu au încercat să evedențieze acest lucru și să tragă un semnal de alarmă, până în momentul de față, la nivelul Uniunii Europene nu există nici o directivă, lege, standard sau normă care să limiteze aceste particule eliminate în

tempul frânării la o anumită valoare sau la o anumită componentă chimică, astfel încât impactul acestora asupra sănătății populației să fie redus la minim.

1.5. Particularități tehnologice privind procesarea materialelor de fricțiune pentru plăcuțe de frână

Datorită complexității și multitudinii constituenților chimici ce compun materialul de fricțiune, literatura de specialitate prezintă diferite metodologii de procesare. Materialul de fricțiune utilizat la producerea plăcuțelor de frână se obține prin metalurgia pulberilor, prin două metode diferite: prin presare și sinterizare (press and sinter) [120,174–177] sau prin presare la cald (hot pressing) [124,153,178–180]. Indiferent de metoda de obținere a acestora, pulberile sunt amestecate utilizând dispozitive speciale.

În ceea ce privește obținerea materialului de fricțiune prin presare și sinterizare aceasta presupune ca amestecul de pulberi obținut în urma mixării să fie introdus în matrițe și presat. După presare, acesta este supus unei sinterizări la temperaturi ridicate, în cuptoare speciale. Procesul de presare la cald implică presarea și sinterizare pulberii în matrițe în același timp [181,182]. Literatura de specialitate oferă informații vaste în ceea ce privește parametrii utilizați în cadrul procesului de presare la cald.

1.6. Aspecte privind tehnicile de testare și caracterizare a materialelor de fricțiune pentru plăcuțe de frână

Pentru o caracterizare completă a materialelor pentru plăcuțe de frână sunt necesare o serie de încercări și teste. Principalele teste ce se regăsesc în literatura de specialitate pot fi clasificate în trei categorii:

- teste de laborator,
- teste pe standuri cu role,
- teste de drum (teste dinamice).

Fiecare dintre aceste teste oferă diferite informații despre comportamentul materialelor de fricțiune.

1.6.1. Teste de laborator

Testele de laborator sunt în principal teste efectuate pe probe mici din materialul de fricțiune. Cu toate acestea sunt dispozitive ce permit testarea materialului de fricțiune la dimensiune reală.

Testele de laborator pot varia de la simple teste de frecare la viteză și presiune constantă până la teste complexe efectuate pe aparate programate să respecte anumite proceduri de testare ce implică frânări sau decelerări multiple la diferite temperaturi și presiuni [33]. În acest sens, cele mai comune teste de laborator analizate de literatura de specialitate sunt: [80,127,129,138–141,150,155,179,185,187–196]:

- i. teste de tip pin-pe-disc,
- ii. teste pe mașina de tip CHASE,
- iii. teste pe standuri inerțiale (dinamometre),
- iv. teste pe mașina de tip FAST (friction assessment and screening test).

1.6.2. Teste pe standuri cu role

Testele pe standuri cu role se efectuează în cadrul stațiilor special amenajate în acest scop. Metodologia de testare este standard și este aplicată pentru toate autovehiculele aflate în circulație, atât pe teritoriul țării noastre cât și la nivel european. Testele se fac în cadrul inspecției tehnice periodice [221], procedură ce este obligatorie pentru toate autovehiculele aflate în circulație. Inspecțiile tehnice periodice se fac la intervale stabilite de lege, în funcție de vechimea autoturismelor. Aceste teste nu oferă detalii despre performanțele materialului de fricțiune sau despre comportamentul acestuia în diferite situații.

Principalul parametru măsurat în cadrul acestui tip de test este forța de frânare [222], la care se poate adăuga și dezechilibrul în timpul frânării dintre roțile aceleiași punți [40,223].

1.6.3. Teste de drum

Testele de drum sunt teste finale pentru certificarea unui material de fricțiune și distribuirea acestuia ca plăcuță de frână (produsul final) către clienți îl constituie testul dinamic de drum [33].

1.7. Analiză asupra posibilității de reciclare a materialelor de fricțiune

Ideea de reciclare a materialelor de fricțiune utilizate în cadrul sistemelor de frânare nu este un subiect actual. În urma cercetării bibliografice realizate, s-a observat că literatura de specialitate prezintă foarte puține informații referitoare la reciclarea materialelor de fricțiune, deși la nivel european au fost aprobate proiecte de cercetare cu această temă. Conform unui proiect de cercetare realizat de către Agenția Executivă pentru Climă, Infrastructură și Mediu în cadrul Programului pentru mediu și politici climatice (LIFE) încă din anul 1998 a fost adusă în discuție ideea reciclării materialelor de fricțiune utilizate la producerea plăcuțelor de frână.

Reciclarea materialelor de fricțiune prin tocarea mecanică și reutilizarea lor sub formă de pulberi în vederea realizării unor noi materiale de fricțiune este o tehnică foarte puțin tratată de literatura de specialitate

Din cunoștințele autorului, la nivelul României, plăcuțele de frână uzate se reciclează ca deșeurile de fier, fiind colectate de companii specializate și autorizate în realizarea operațiunilor de acest fel.

1.8. Concluzii privind stadiul actual al cercetărilor privind materialele de fricțiune utilizate în construcția plăcuțelor de frână

- Efectul de diminuare a capacității de frânare este în cele mai dese cazuri asociat cu o uzură excesivă a materialului de fricțiune, ceea ce duce la o durată de viață mai scurtă a plăcuțelor de frână. Acest efect de scădere a capacității de frânare este asociat cu descompunerea termică a anumitor constituenți (ex. liantul) prezenți în compoziția materialului de fricțiune.
- Complexitatea unui material compozit de fricțiune utilizat la producerea plăcuțelor de frână face și mai dificilă găsirea unei soluții optime, care să satisfacă toate cerințele impuse acestora (de exemplu: coeficient de frecare mare, dar cât mai stabil într-o gamă de temperaturi cât mai mare, rezistență mare la uzură, eliminarea unei cantități minime de particule).

- Multitudinea constituenților chimici prezenți în compoziția unui material de fricțiune, ce prezintă forme, dimensiuni și comportamente diferite, alături de tehnica și parametrii utilizați pentru procesare dau proprietăți definitorii materialelor de fricțiune compozite.
- Esențială este obținerea unei legături foarte bune între constituenții chimici ai materialului de fricțiune.
- Dimensiunea și orientarea fibrelor de consolidare au un rol foarte important în atribuirea proprietăților mecanice materialului de fricțiune.
- Trebuie făcut un compromis în alegerea aditivilor de fricțiune în ceea ce privește conținutul de abrazivi și de lubrifianți pentru ca materialul de fricțiune obținut să prezinte performanțe ridicate, atât din punct de vedere al stabilității coeficientului de frecare, cât și din punct de vedere al valorilor maxime ale acestuia.
- Principalele dificultăți în înțelegerea proceselor tribologice care apar la interacțiunea dintre plăcuța de frână și discul de frână sunt: compoziția chimică a materialelor de fricțiune, rugozitatea mare a plăcuțelor de frână și diferențele majore între constituenții chimici prezenți în materialul de fricțiune.
- Se dorește o valoare mare a coeficientului de frecare, dar sunt probleme în menținerea acestei valori mari pe durata funcționării (într-un interval mare de temperaturi).
- Degradarea materialului de fricțiune este intensificată de variațiile de temperatură la contactul dintre plăcuță și disc de frână.
- Principalele mecanisme de uzură identificate sunt uzura de abraziune și de adeziune, care apar atât pe suprafața discului, cât și pe suprafața materialului de fricțiune.
- Cercetările efectuate până în acest moment nu au elucidat încă problema poluării datorată materialelor de fricțiune. Aproximativ jumătate din particulele eliminate în aer sunt datorită uzurii și fac parte din categoria PM₁₀, în timp ce cealaltă jumătate reprezintă particule ce sunt depozitate la nivelul carosabilului sau în împrejurimi ori sunt atrase de celelalte autovehicule.
- Funcționarea sistemului de frânare este influențată de condițiile atmosferice.
- Pentru realizarea unor noi materiale de fricțiune ar trebui luate în calcul cât mai multe metode de testare ale acestora, deoarece un singur tip de test nu acoperă toate cerințele impuse acestora.
- Înlocuirea materialelor de fricțiune actuale cu alte materiale care să răspundă atât nevoilor ecologice, cât și celor tehnice este necesară. O alternativă ar fi reprezentată de utilizarea materialelor ceramice și a celor pe bază de carbon, dar din păcate costurile sunt încă semnificative.
- Pe baza rezultatele preliminare prezentate de literatura de specialitate se poate spune că reciclarea materialelor de fricțiune provenite din plăcuțele de frână ieșite din uz ale autovehiculelor în vederea dezvoltării unor noi materiale compozite este posibilă, dar cu condiția ca materialele obținute să prezente performanțe similare cu ale materialelor de referință, iar cu mici modificări să existe posibilitatea de îmbunătățire a acestora.

Capitolul 2. Materiale luate în studiu și aparatura utilizată

2.1. Materiale luate în studiu

Pentru realizarea cercetării s-au luat în studiu atât materiale de fricțiune comerciale, dar au fost propuse și materiale de fricțiune noi.

2.1.1. Materiale de fricțiune comerciale luate în studiu

Au fost propuse spre analiză trei tipuri de materiale extrase din plăcuțe de frână comerciale (producători diferiți) utilizate în cadrul sistemelor de frânare ale autovehiculelor de clasă medie. De asemenea trebuie menționat faptul că cele trei materiale de fricțiune fac parte din categorii de performanță diferite.

Datorită confidențialității în ceea ce privește materialele de fricțiune utilizate pentru realizarea plăcuțelor de frână studiate, în această lucrare nu a fost utilizată denumirea lor comercială, astfel materialele de fricțiune studiate au fost denumite astfel:

- BP-T – materiale de fricțiune din plăcuțe de frână de calitate înaltă,
- BP-R – materiale de fricțiune din plăcuțe de frână de calitate medie,
- BP-U – materiale de fricțiune din plăcuțe de frână de calitate scăzută.

2.1.2. Materiale compozite de fricțiune noi

Materialele de fricțiune dezvoltate în cadrul prezentei teze de doctorat au fost realizate în urma analizei posibilității de reciclare a materialelor de fricțiune scoase din uz.

Plăcuțele de frână uzate au fost colectate și supuse unui procedeu de frezare cu ajutorul unei mașini de frezare cu comandă numerică (detalii sunt prezentate în Subsecțiunea 2.2.5), în vederea obținerii pulberii pentru dezvoltarea de materiale noi de fricțiune. Astfel, pe lângă pulberea de material de fricțiune obținută din plăcuțele de frână uzate, considerată matricea materialului nou de fricțiune, au fost considerați următorii componenți: fibre de aramidă, oxid de titan, silicat de zirconiu ($ZrSiO_4$), rășină fenolică.

2.1.3. Filtre comerciale utilizate

Dacă în cazul materialelor de fricțiune au fost alese trei tipuri de materiale de fricțiune, de la producători diferiți, și din categorii de performanță diferite, în cazul filtrelor au fost alese trei tipuri de filtre de habitacul comerciale din categorii de performanță diferite, dar care aparțin aceluiași producător. În acest sens, datorită confidențialității, cele trei tipuri de filtre au fost denumite astfel: NF – filtru simplu, CF – filtru cu inserție de carbon activ, AF – filtru anti-alergenic.

2.2. Tehnici experimentale și aparatură de cercetare utilizată

2.2.1. Descrierea standului inerțial dezvoltat

Standul inerțial a fost realizat în cadrul proiectului de licență [232] în anul 2020, și a fost validat în cadrul lucrării de disertație [233]. Mai multe detalii legate de componentele standului inerțial dar și despre modul de funcționare al acestuia se regăsesc în studiile anterioare [232,233].

Pentru cercetările realizate în cadrul tezei de doctorat au fost necesare câteva îmbunătățiri ale standului inerțial după cum urmează:

- a. standul inerțial a fost echipat cu un senzor de temperatură cu infraroșu.
- b. echiparea standului cu un senzor Hall (la nivelul standului) și a 3 magneți, la distanțe egale unul față de celălalt (la nivelul volantului) pentru măsurarea distanței teoretice de frânare
- c. în cadrul mecanismului de acționare al frânei a fost instalat un senzor care înregistrează poziția pedalei de frână în sistem binar: acționată sau neacționată.
- d. echiparea standului cu o incintă pe care a fost instalat un senzor ce măsoară densitatea de particule din aer, marca Sharp, ce poate detecta particule de până la 0,8 μm , un ventilator pentru a asigura curgerea corespunzătoare a aerului și un suport pentru probele din filtru.

O imagine de ansamblu a standului inerțial dar și o schiță a acestuia realizate în urma îmbunătățirilor sunt prezentate în Figura 2.6.

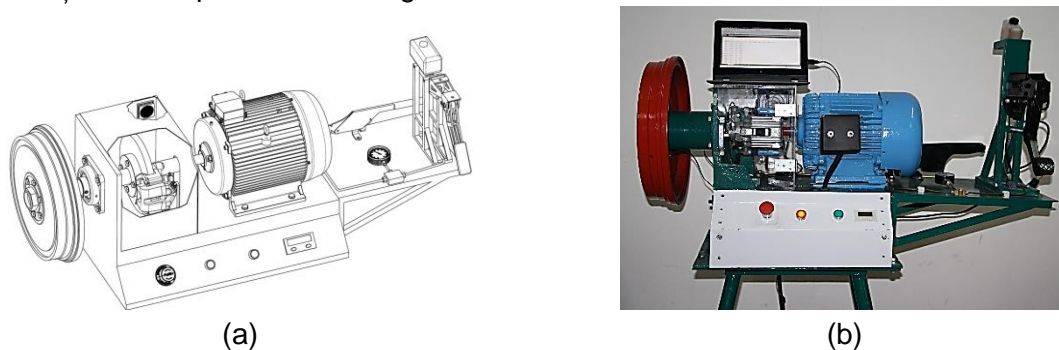


Figura 2.6. Imagine de ansamblu a standului inerțial

2.2.2 Teste tribologice

Pentru determinarea proprietăților tribologice ale materialelor de fricțiune comerciale (coeficient de frecare – COF și uzura – pierdere de masă) a fost utilizată configurația pin-pe-disc.

În cadrul acestei cercetări doctorale au fost efectuate două tipuri de teste tribologice:

1. Teste tribologice pe un tribometru comercial (CETR-UMT-2),
2. Teste tribologice pe un stand de testare tribologică dezvoltat.

2.2.3. Teste dinamice cu ajutorul autoturismului

Pentru a putea fi înțeles comportamentul materialelor de fricțiune în cadrul utilizării lor în condiții dinamice, un autovehicul de clasă medie a fost echipat cu aparatura necesară monitorizării următorilor parametri: temperatura suprafeței de contact a discului de frână, distanța de frânare, timpul de frânare.

Pentru analiză a fost ales sistemul de frânare de pe puntea din spate a autovehiculului, acesta fiind un sistem de frânare similar cu cel montat pe standul inerțial (prezentat la Subsecțiunea 2.2.1).

2.2.4. Dezvoltarea echipamentului de presare la cald

În vederea realizării materialelor noi de fricțiune prin procesul de presare la cald (hot pressing) a fost necesară dezvoltarea unui echipament. A fost aleasă metoda presării la cald datorită temperaturilor joase la care se poate realiza acest proces.

În Figura 2.13 este prezentat echipamentul de presare la cald dezvoltat în cadrul acestei teze de doctorat, unde sunt evidențiate toate părțile componente.



Figura 2.13. Echipamentul de presare la cald dezvoltat: 1 – presă hidraulică, 2 – matriță, 3 – dispozitiv de încălzire prin inducție, 4 – sursă de curent continuu

2.2.5. Altă aparatură utilizată

Atât pentru extragerea probelor din plăcuțele de frână comerciale, cât și pentru obținerea pulberii din plăcuțele de frână uzate în vederea dezvoltării noilor materiale de fricțiune s-a utilizat o mașină de frezare cu comandă numerică.

Pentru cuantificarea pierderii de masă în cazul testelor tribologice, dar și pentru cântărirea cantității de pulbere necesare realizării probelor din noile materiale de fricțiune a fost utilizată o balanță analitică cu precizia de măsurare de 0,001 g.

În vederea realizării unei bune distribuții a componentelor chimice (amestecul de pulberi) în noile materiale de fricțiune, acestea au fost amestecate mecanic cu ajutorul unui dispozitiv de amestecare cu bile

Caracterizarea materialelor în ceea ce privește duritatea s-a realizat cu ajutorul unui durimetru marca INSIZE, cu o încărcare de 1N timp de 10s.

Utilizarea microscopului electronic a permis analizarea morfologică a tuturor materialelor de fricțiune luate în studiu. Analiza EDAX a permis identificarea constituenților chimici prezenți în materialele de fricțiune. De asemenea cu ajutorul analizei SEM au fost analizate urmele de uzură și identificate principalele mecanisme care duc la deteriorarea tribosistemului plăcuță – disc de frână. Filtrele utilizate în cadrul testelor privind densitatea de particule eliminată în timpul frânării au fost supuse unei analize SEM înainte și după de testare. După testare filtrele au fost supuse și analizei EDAX pentru a identifica natura particulelor care se desprind din materialele de fricțiune.

2.3. Realizarea probelor

2.3.1. Realizarea probelor din materialele de fricțiune comerciale

Probele din plăcuțele de frână comerciale utilizate în cadrul testelor pe standul inerțial, cât și cele utilizate pentru testele tribologice au fost extrase cu mașina de frezare cu comandă numerică prezentată în Subsecțiunea 2.2.5.

Probele finale extrase sunt prezentate în Figura 2.29. Pentru efectuarea tuturor determinărilor realizate pe standul inerțial, pentru fiecare test a fost utilizată o pereche de probe cu secțiune pătrată.



Figura 2.29. Probe din material de fricțiune comercial utilizate în cadrul determinărilor: (a) probe cu secțiune pătrată – pentru testele pe standul inerțial și (b) probe cilindrice pentru testele tribologice

2.3.2. Realizarea materialelor compozite de fricțiune noi prin presare la cald

În vederea dezvoltării materialelor noi de fricțiune din plăcuțe de frână comerciale uzate (prin reciclare) pe baza rezultatelor obținute prin testarea în diferite condiții a celor trei materiale de fricțiune comerciale analizate în cadrul acestei teze de doctorat, a fost selectat materialul de fricțiune BP-R, adică materialul de fricțiune extras din plăcuțele de frână de calitate medie.

Materiale compozite de fricțiune noi au fost realizate prin presare la cald (mai multe detalii despre echipamentul dezvoltat sunt date în Subsecțiunea 2.2.4). Pentru realizarea probelor au fost parcurse mai multe etape:

Etapa 1. Amestecarea componentelor utilizate pentru materialele compozite

Etapa 2. Introducerea cantității de pulbere în matrițe

Etapa 3 Pregătirea probelor prin procesul de presare la cald

Compoziția chimică a materialului de referință a fost obținută și optimizată prin încercări din aproape în aproape. Astfel s-a propus realizarea a 5 rețete de materiale compozite de fricțiune noi (Tabelul 2.3).

Parametrii folosiți pentru procesarea prin presare la cald a rețetelor de material compozit propuse sunt:

- presiunea de compactare a amestecului: 125 ± 5 MPa;
- încălzire de la temperatura camerei până la temperatura de $150 \pm 10^\circ\text{C}$ (în cadrul acestui proces, presiunea de 125 ± 5 MPa a fost menținută constantă și ajustată până la stabilizarea acesteia),
- durate de menținere: 10 min,
- etapă de răcire naturală.

Tabelul 2.3. Simbolurile și concentrația materialelor de fricțiune propuse

Denumire material	Proporție
RR	94,5%BP-R_0,5%F_5%R
RR_10%TiO ₂	84,5%BP-R_10%TiO ₂ _0,5%F_5%R
RR_20%TiO ₂	74,5%BP-R_20%TiO ₂ _0,5%F_5%R
RR_10%ZrSiO ₄	84,5%BP-R_10%ZrSiO ₄ _0,5%F_5%R
RR_20%ZrSiO ₄	74,5%BP-R_20%ZrSiO ₄ _0,5%F_5%R

2.3.3. Realizarea probelor din filtru

În vederea realizării testelor privind eficiența filtrelor de habitacul ale autovehiculelor rutiere și densitatea particulelor eliminate de către materialul de fricțiune în timpul frânării, din filtrele comerciale au fost extrase probe pătrate cu dimensiunea de 93 x 93 mm.

Pentru comparație au fost realizate teste de măsurare a densității de particule eliminate în timpul frânării fără utilizarea unui filtru, pentru toate materialele de fricțiune. Aceste teste sunt codificate în lucrare cu FF (fără filtru).

2.3.4. Contrapiesa utilizată

În cazul tuturor testelor realizate în cadrul acestei teze de doctorat, contrapiesa utilizată este reprezentată de un disc de frână real, excepție făcând doar testele realizate pe tribometru CETR-UMT-2 unde, datorită construcției și limitărilor aparatului în ceea ce privește dimensiunea probelor ce pot fi utilizate, a fost utilizat un disc de dimensiuni mai mici. Ambele tipuri de discuri sunt din fonta cenușie. Discul de frână real are un diametru de 230 mm și o grosime de 11 mm, iar discul utilizat în cadrul testelor realizate pe tribometrul CETR-UMT-2 are diametru de 65 mm și o grosime de 5 mm.

2.4. Concluzii privind materiale luate în studiu și aparatura utilizată

Cercetările efectuate în cadrul prezentei teze de doctorat s-au concentrat pe caracterizarea globală a comportamentului a trei tipuri de materiale de fricțiune utilizate la producerea plăcuțelor de frână: BP-T – materiale de fricțiune din plăcuțe de frână de calitate înaltă, BP-R – materiale de fricțiune din plăcuțe de frână de calitate medie și BP-U – materiale de fricțiune din plăcuțe de frână de calitate scăzută.

Materialele comerciale luate în studiu în cadrul tezei de doctorat au fost supuse mai multor tipuri de teste pentru ca rezultatele obținute să fie cât mai complexe și să ofere informații globale în vederea propunerii unor materiale de fricțiune noi.

Pentru caracterizarea globală materialelor luate în studiu în această teză de doctorat au fost utilizate următoarele echipamente:

Stand inerțial. Standul inerțial a fost dezvoltat în cadrul proiectului de licență al autorului, iar validarea lui a fost realizată în cadrul lucrării de disertație. Îmbunătățiri considerabile au fost aduse standului în cadrul studiilor doctorale: a fost echipat cu un senzor de temperatură cu infraroșu, a fost utilizat un sistem format dintr-un senzor Hall și 3 magneți care ajută la calculul unei distanțe teoretice de frânare pe baza înregistrării numărului de rotații efectuate de către volant până la oprirea completă, în cadrul mecanismului de acționare al frânei a fost instalat un senzor care înregistrează poziția pedalei de frână în sistem binar: acționată sau neacționată și astfel se poate calcula distanța de oprire cu precizie. Senzorii

instalați pe stand sunt conectați la o placă de dezvoltare Arduino R3 și astfel toate valorile sunt înregistrate în timp real.

O altă modificare importantă adusă standului inerțial în cadrul cercetărilor doctorale a fost dezvoltarea unui modul ce se poate atașa standului inerțial în vederea măsurării densității de particule eliminate în timpul frânării și care permite analizarea eficienței elementelor de filtrare a aerului din cabina autovehiculelor rutiere. Standul inerțial în acest moment este versatil și permite realizarea în același timp atât a testelor mecanice cât și a testelor privind densitatea de particule eliminată în timpul frânării și eficiența elementelor de filtrare. În cadrul testelor pot fi utilizate plăcuțe de frână reale sau probe de dimensiuni reduse (util în cazul materialelor noi) din materiale de fricțiune.

Tribometre. Încercările tribologice au fost realizate în două condiții: pe un tribometru comercial și pe un tribometru construit în cadrul Departamentului de Inginerie Mecanică al Universității „Dunărea de Jos” din Galați.

Autoturism. Autoturismul a fost utilizat pentru realizarea testelor dinamice. Aceste încercări au fost realizate pe un autoturism de clasă medie ce a fost echipat cu aparatura necesară monitorizării în timp real a condițiilor de frânare (timp, temperatură, distanță, etc.).

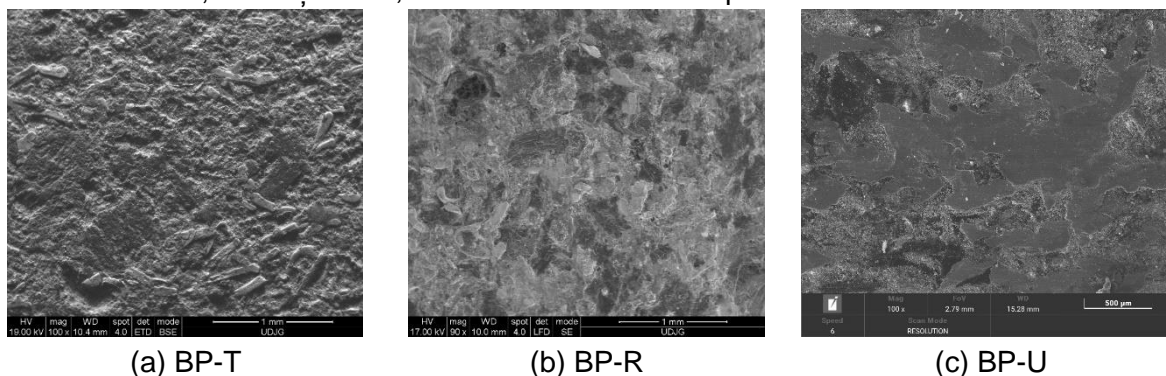
- Încercările pe standul inerțial au fost realizate în multiple condiții: mediu uscat, umed și cu particule abrazive. Tot pe standul inerțial au fost realizate încercări privind analiza particulelor eliminate în timpul frânării și eficiența elementelor de filtrare ale autovehiculelor rutiere.
- Încercările pe tribometre au fost realizate pentru determinarea proprietăților tribologice ale materialelor de fricțiune comerciale (coeficient de frecare – COF și uzura – pierdere de masă), iar pentru teste a fost utilizată configurația pin-pe-disc.
- Încercările s-au realizat pe probe de dimensiuni reduse: pentru testele realizate pe standul inerțial au fost utilizate probe cu secțiune pătrată iar pentru cele tribologice au fost utilizate probe cilindrice. Doar în cazul testelor realizate pe automobil au fost utilizate plăcuțele de frână cu dimensiune reală.
- Probele din plăcuțele de frână comerciale utilizate în cadrul testelor pe standul inerțial (cu secțiune pătrată), cât și cele utilizate pentru testele tribologice (probe cilindrice) au fost extrase cu o mașină de frezare cu comandă numerică, asigurând repetabilitatea.
- În cadrul prezentei teze de doctorat au fost dezvoltate și materialele noi de fricțiune ce au fost realizate în urma analizei posibilității de reciclare a materialelor de fricțiune scoase din uz.
- Materialele compozite de fricțiune noi au fost realizate prin presare la cald.
- În vederea realizării materialelor noi de fricțiune prin procesul de presare la cald (hot pressing) a fost dezvoltat un nou echipament de presare la cald.
- Materialele de fricțiune propuse au fost caracterizate din punct de vedere tribologic utilizând configurația pin (material de fricțiune)–pe–disc (disc de frână rea).
- În vederea analizelor microstructurale și a urmelor de uzură după teste a fost utilizat microscopul electronic.

Capitolul 3. Rezultate experimentale privind comportamentul materialelor de fricțiune comerciale propuse analizei

3.1. Analize micrografice de structură, duritate și porozitate

3.1.1. Analize microstructurale

În Figura 3.1 este prezentată microstructura probelor extrase din plăcuțele de frână comerciale BP-T, BP-R și BP-U, iar analiza chimică este prezentată în Tabelul 3.1.



(a) BP-T

(b) BP-R

(c) BP-U

Figura 3.1. Imagini SEM ale microstructurii probelor: 237]

Tabelul 3.1. Analiza EDAX reprezentativă pe suprafața probelor prezentate în Figura 3.1 [237]

Elemente (%)	BP-T	BP-R	BP-U
C	55,41	62,14	51,53
O	29,16	18,43	17,21
Mg	1,33	0,56	0,57
Al	0,56	1,68	1,75
Si	0,45	1,11	2,32
P	0,02	0,11	0,33
S	1,75	1,46	1,31
K	0,07	-	0,31
Ca	0,6	2,02	1,90
Ba	3,11	-	2,58
Ti	0,12	0,63	0,25
Cr	0,02	-	-
Mn	0,05	0,6	0,15
Fe	4,41	10,6	16,54
Cu	-	-	0,66
Zn	0,14	1,2	0,63
Zr	2,58	-	1,96

Conform literaturii de specialitate [116,118], și a analizei chimice efectuate asupra materialelor de fricțiune, plăcuțele de frână luate în studiu se încadrează în categoria plăcuțelor de frână cu un conținut scăzut de metal.

3.1.2. Teste de duritate și porozitate

Figura 3.2 prezintă valorile medii ale durității pentru cele trei materiale de fricțiune comerciale BP-T, BP-R și BP-U.

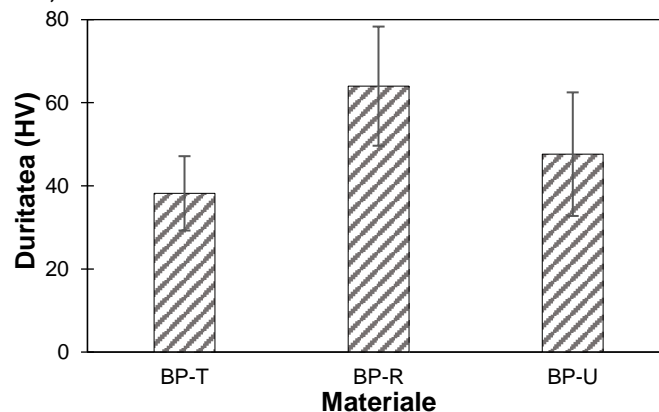


Figura 3.2. Valorile durității pentru materialele de fricțiune [237]

În ceea ce privește duritatea materialului din care a fost realizat discul de frână, acesta are o valoare de 294 ± 8 HV. Figura 3.3. prezintă rezultatele testelor de porozitate pentru materialele de fricțiune comerciale studiate.

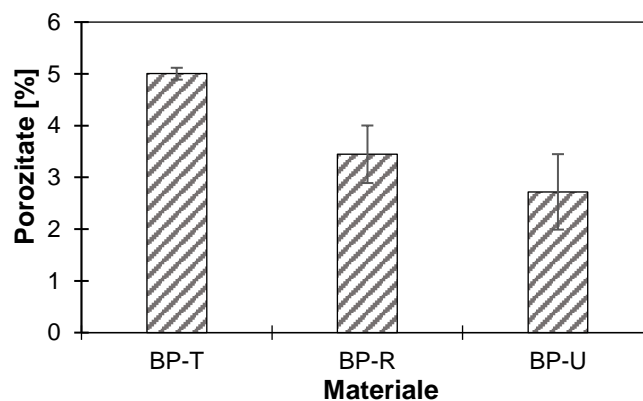


Figura 3.3. Porozitatea materialelor de fricțiune comerciale

3.1.3. Concluzii

- Din punct de vedere microstructural materialele de fricțiune BP-T și BP-R prezintă o distribuție mai omogenă a componentelor chimice, în timp ce în cazul materialului BP-U se observă aglomerări de elemente chimice în anumite zone. Acest lucru poate fi explicat de utilizarea unei proceduri deficiente de amestecare/distribuție a componentelor chimice.
- Analizele EDAX indică faptul că materiale de fricțiune comerciale studiate se încadrează în categoria plăcuțelor de frână cu un conținut scăzut de metal. Cantitatea cea mai mică de conținut metalic a fost identificată în cazul materialului BP-T, iar cea mai mare în cazul materialului BP-U.
- Cea mai mare valoare a durității a fost obținută în cazul materialului de fricțiune BP-R, probabil datorită cantității mai mari de rășină utilizată și a unei cantități importante de fibre de

consolidare, ceea ce oferă o legătură mai bună între toți constituenții chimici prezenți în compoziția materialului de fricțiune.

- Cel mai mic grad de porozitate a fost măsurat în cazul materialului de fricțiune BP-U.

3.2. Rezultate privind încercările materialelor pentru plăcuțe de frână pe standul inerțial

3.2.1. Studiu privind încercările materialelor de fricțiune în diferite medii (uscat, umed și cu particule abrazive)

3.2.1.1. Condiții de încercare a testelor realizate pe standul inerțial în diferite medii (uscat, umed și cu particule abrazive)

Parametrii de încercare (constanți și variabili) utilizați, cât și parametrii care se obțin în urma testelor realizate pe standul inerțial sunt prezentați în Figura 3.4.

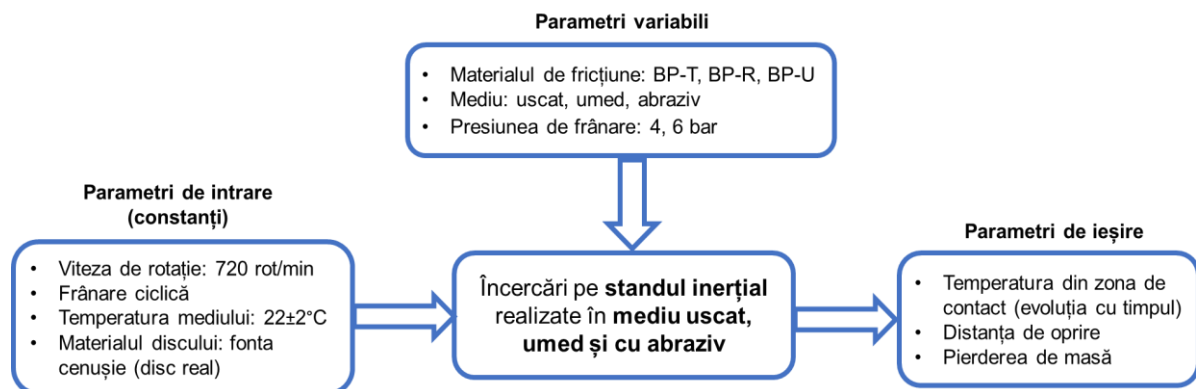


Figura 3.4. Parametrii de intrare (constanți și variabili) și de ieșire pentru testele realizate pe standul inerțial

3.2.1.2. Rezultate privind încercările materialului de fricțiune în diferite medii (uscat, umed și cu abraziv)

i. Evoluția temperaturii în zona de contact

Evoluția temperaturii înregistrată în zona de contact cu timpul de frânare (pentru cele 10 frânări consecutive) și pentru cele trei condiții studiate (mediu uscat, umed și cu particule abrazive) în cazul materialului BP-T este prezentată în Figura 3.6 (prima coloană pentru presiunea aplicată de 4 bar, iar coloana a doua pentru presiunea aplicată de 6 bar). Aceste rezultate oferă o imagine asupra comportamentului termic al materialului de fricțiune BP-T atât pe durata unei frânări, cât și pe durata întregului ciclu de frânare (cele 10 frânări consecutive). Se poate observa că temperatura din zona de contact a crescut de la prima la ultima frânare în cazul tuturor testelor realizate pe materialul BP-T.

Odată cu creșterea presiunii de contact de la 4 la 6 bar atât în mediu uscat cât și în mediu umed se observă o ușoară tendință de scădere a temperaturii maxime înregistrate de la prima la ultima frânare. În cazul în care avem în contact particule abrazive se observă un comportament opus, adică o ușoară creștere a temperaturii.

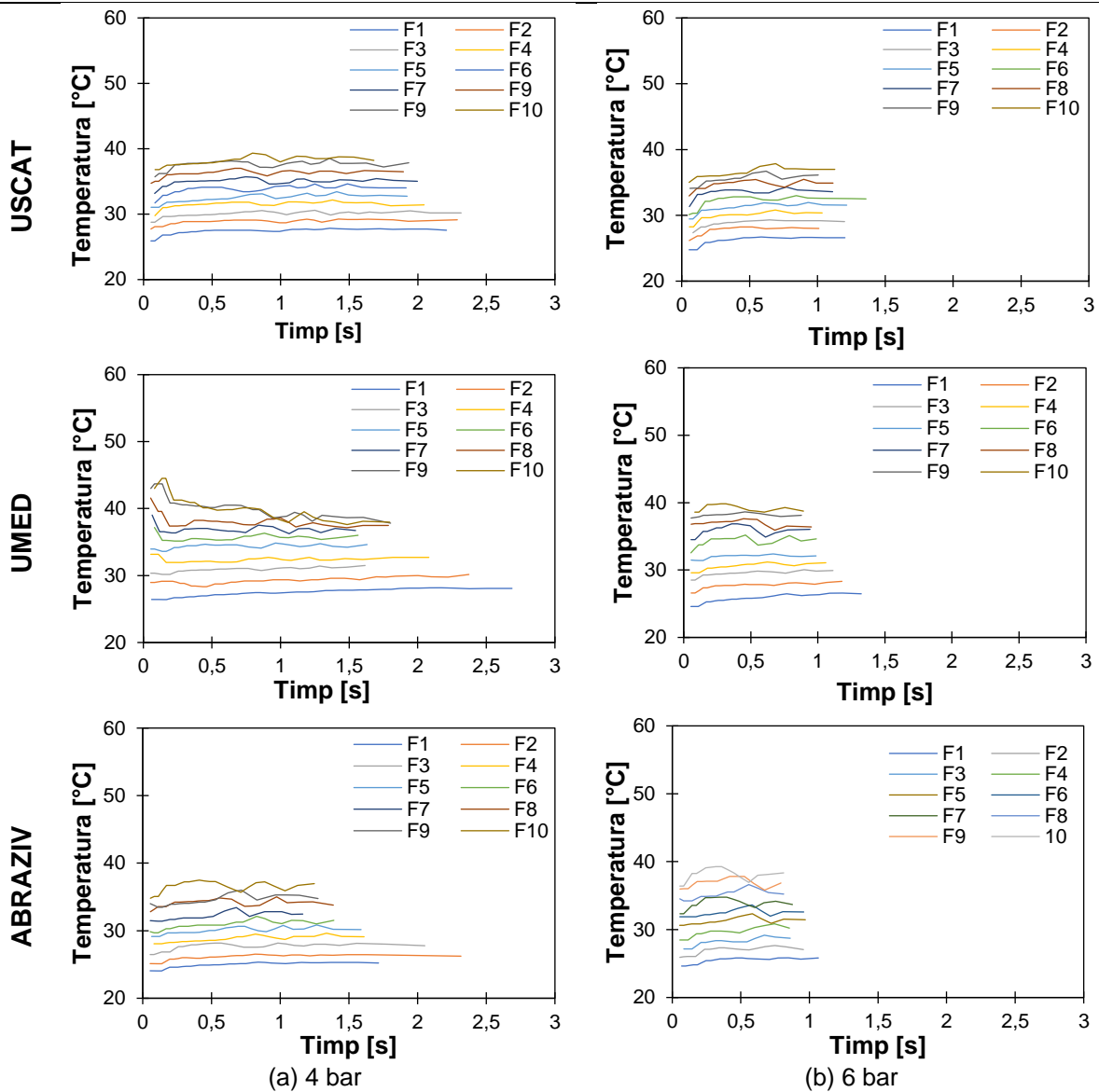


Figura 3.6. Variația temperaturii din zona de contact cu timpul pentru cele 10 frânări consecutive în cazul materialului BP-T: (a) 4 bar și (b) 6 bar

Variația valorilor temperaturii din zona de contact cu timpul pentru probele din materialul de fricțiune BP-R este prezentată în Figura 3.7.

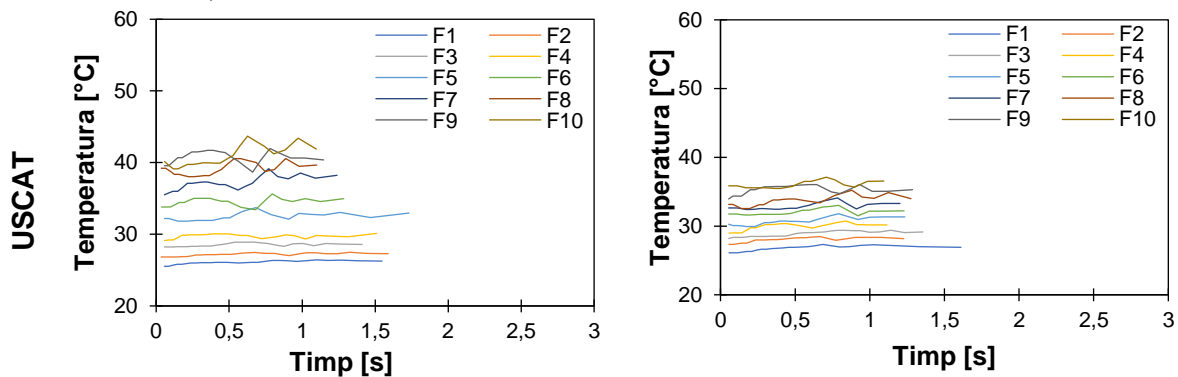


Figura 3.7. Variația temperaturii din zona de contact cu timpul pentru cele 10 frânări consecutive în cazul materialului BP-R (a) 4 bar și (b) 6 bar

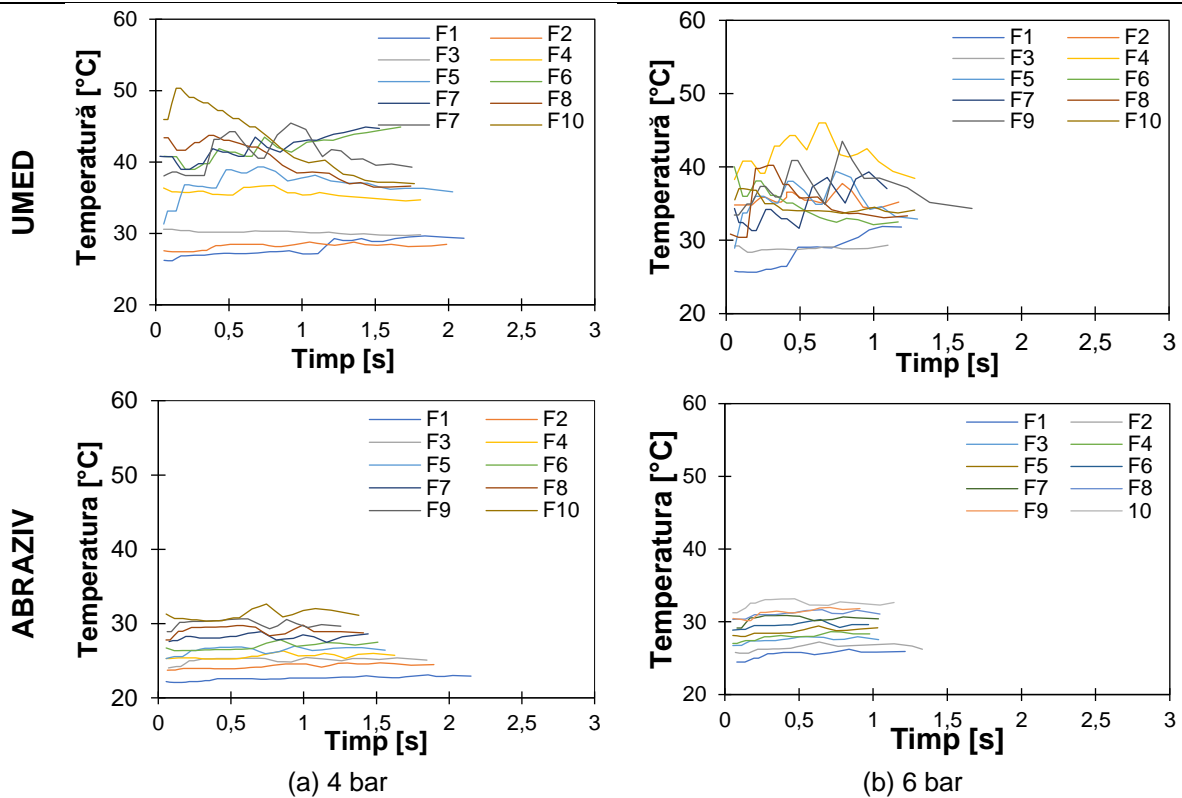


Figura 3.7. Variația temperaturii din zona de contact cu timpul pentru cele 10 frânări consecutive în cazul materialului BP-R (a) 4 bar și (b) 6 bar (continuare)

În ceea ce privește stabilitatea termică a materialului de fricțiune testat în mediu umed și în mediu uscat se poate observa că cele mai bune rezultate au fost obținute în cadrul testelor în mediu uscat, la o presiune de 6 bar, urmate de cele în mediu uscat la 4 bar. În cazul testelor efectuate la presiunea de 6 bar, au fost obținute rezultatele favorabile în ceea ce privește timpul de frânare în cazul frânărilor efectuate în mediul umed deși diferența dintre frânărilor în mediul uscat și cel umed nu este semnificativă

În Figura 3.8 este prezentată variația temperaturii din zona de contact pentru materialul de fricțiune BP-U.

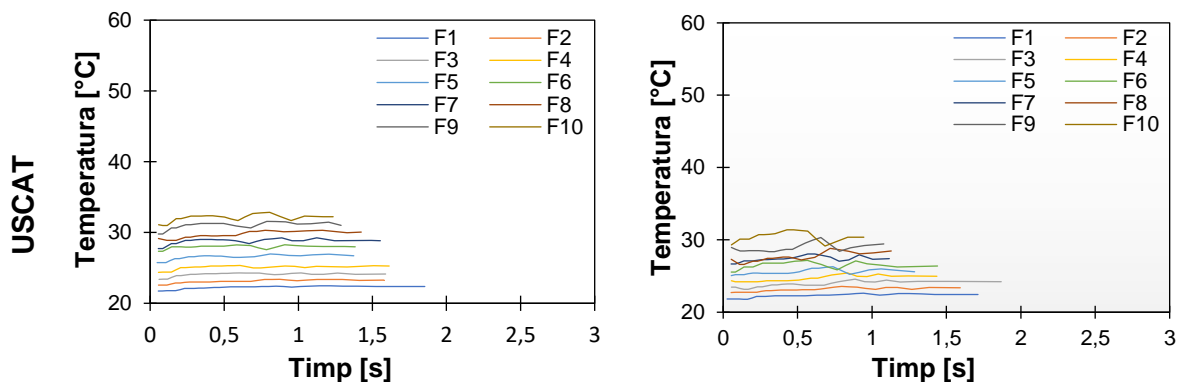


Figura 3.8. Variația temperaturii din zona de contact cu timpul pentru cele 10 frânări consecutive în cazul materialului BP-U: (a) 4 bar și (b) 6 bar

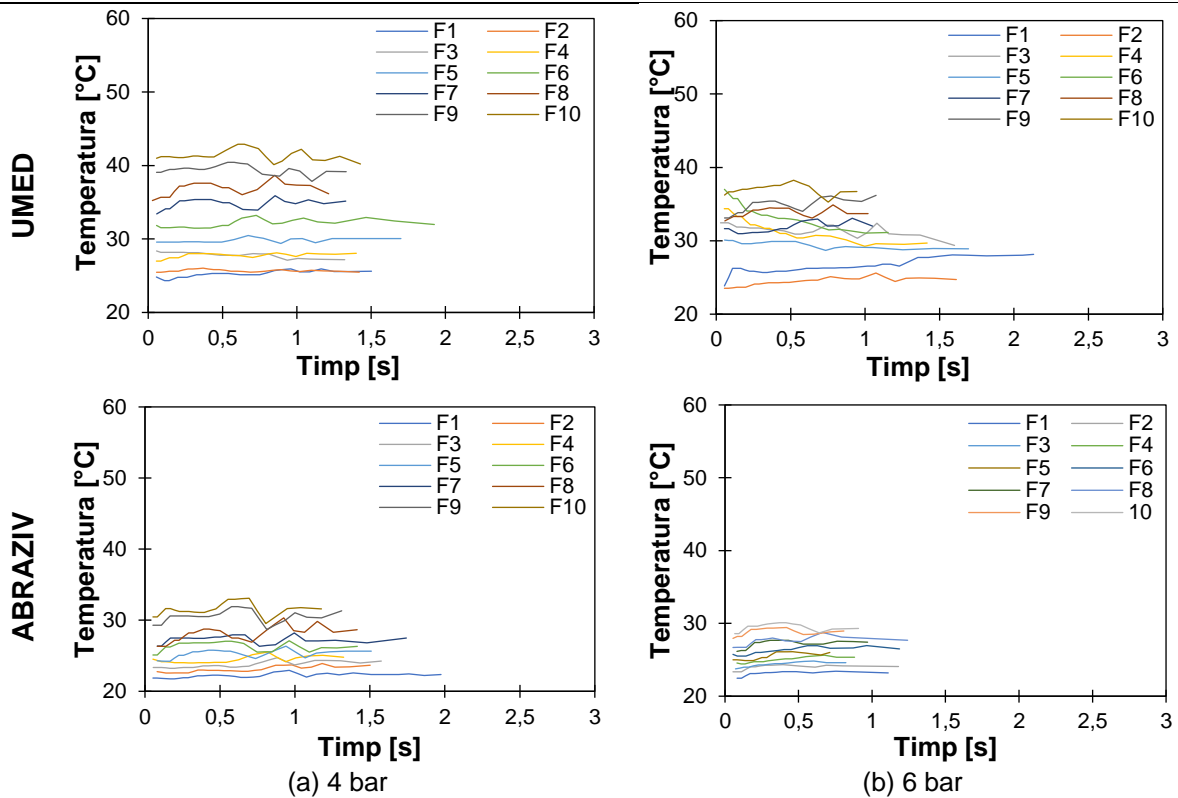


Figura 3.8. Variația temperaturii din zona de contact cu timpul pentru cele 10 frânări consecutive în cazul materialului BP-U: (a) 4 bar și (b) 6 bar (continuare)

Analizând global rezultatele testelor efectuate în aceste condiții se poate observa că temperatura minimă a fost obținută în cazul materialului BP-U (30-31°C) în mediu uscat cu sau fără abraziv, cu o bună stabilitate termică pe durata celor 10 frânări consecutive și cu o diminuare a timpului de frânare odată cu creșterea temperaturii de la prima la ultima frânare (de la 1,2 - 1,7 s la prima frânare până la 0,8 - 1 s la ultima frânare). Din punct de vedere al stabilității termice pe tot ciclul de frânare și a timpului de frânare rezultate bune au fost obținute și în cazul materialelor BP-T și BP-R în cazul presiunii de 6 bar.

ii. Distanța de oprire

În Figura 3.9 se observă evoluția distanței de oprire cu presiunea aplicată după 10 frânări consecutive pentru cele trei materiale de fricțiune comerciale.

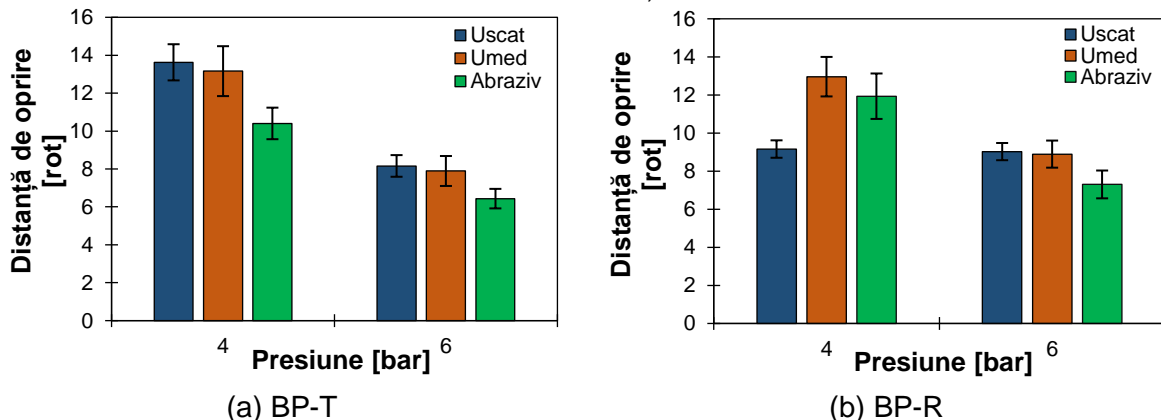
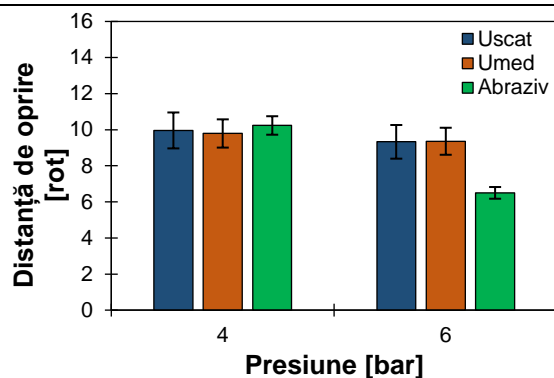


Figura 3.9. Distanța de oprire funcție de presiunea aplicată după 10 frânări consecutive pentru cele trei materiale de fricțiune comerciale



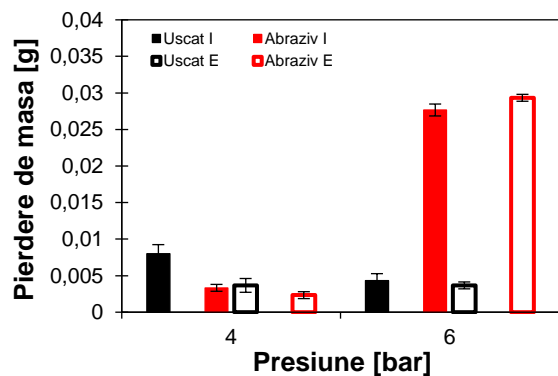
(c) BP-U

Figura 3.9. Distanța de oprire funcție de presiunea aplicată după 10 frânări consecutive pentru cele trei materiale de fricțiune comerciale (continuare)

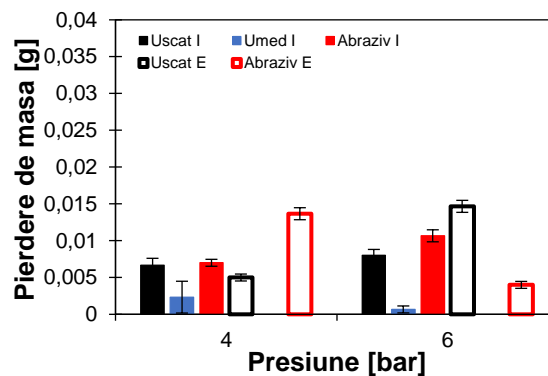
Presiunea de frânare are o influență semnificativă asupra distanței de frânare, se observă că în cazul tuturor materialelor studiate distanțele de oprire la presiunea de 6 bar sunt mai mici decât distanțele de oprire înregistrate la presiunea de 4 bar.

iii. Pierderea de masă

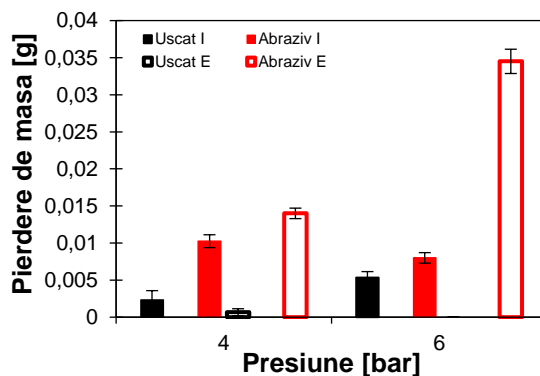
În figura 3.10 este prezentă evoluția pierderii de masă cu presiunea aplicată, după 10 frânări consecutive realizate în mediu uscat, umed și cu particule abrazive pentru cele trei materiale de fricțiune comerciale luate în studiu.



(a) BP-T



(b) BP-R



(c) BP-U

Figura 3.10. Pierderea de masă funcție de presiunea aplicată după 10 frânări consecutive: (a) BP-T, (b) BP-R, (c) BP-U

3.2.1.3. Caracterizarea suprafețelor uzate (mediu uscat, umed și cu particule abrazive) pe baza microscopiei electronice de baleiaj (SEM)

În urma testelor realizate pe standul inerțial în diferite condiții a fost realizată o analiză microscopică a suprafețelor probelor testate la presiunea de 6 bar (doar pentru probele de pe partea exterioară – E), în vederea identificării mecanismelor de uzură

Figura 3.12 prezintă imaginile SEM (cu două mărimi) a suprafețelor de frecare a probelor din materialul de fricțiune BP-T ce au fost testate în mediu uscat, mediu umed și cu particule abrazive.

Se poate observa cu ușurință că în cazul materialului de fricțiune BP-T, atât în condițiile de testare în mediul uscat, umed, cât și în cazul testelor cu particule abrazive este prezentă uzura abrazivă (uzura de abraziune între două corpuri și uzura de abraziune între trei corpuri), acest lucru fiind confirmat de canalele (zgârieturile) ce sunt aliniate cu direcția de alunecare.

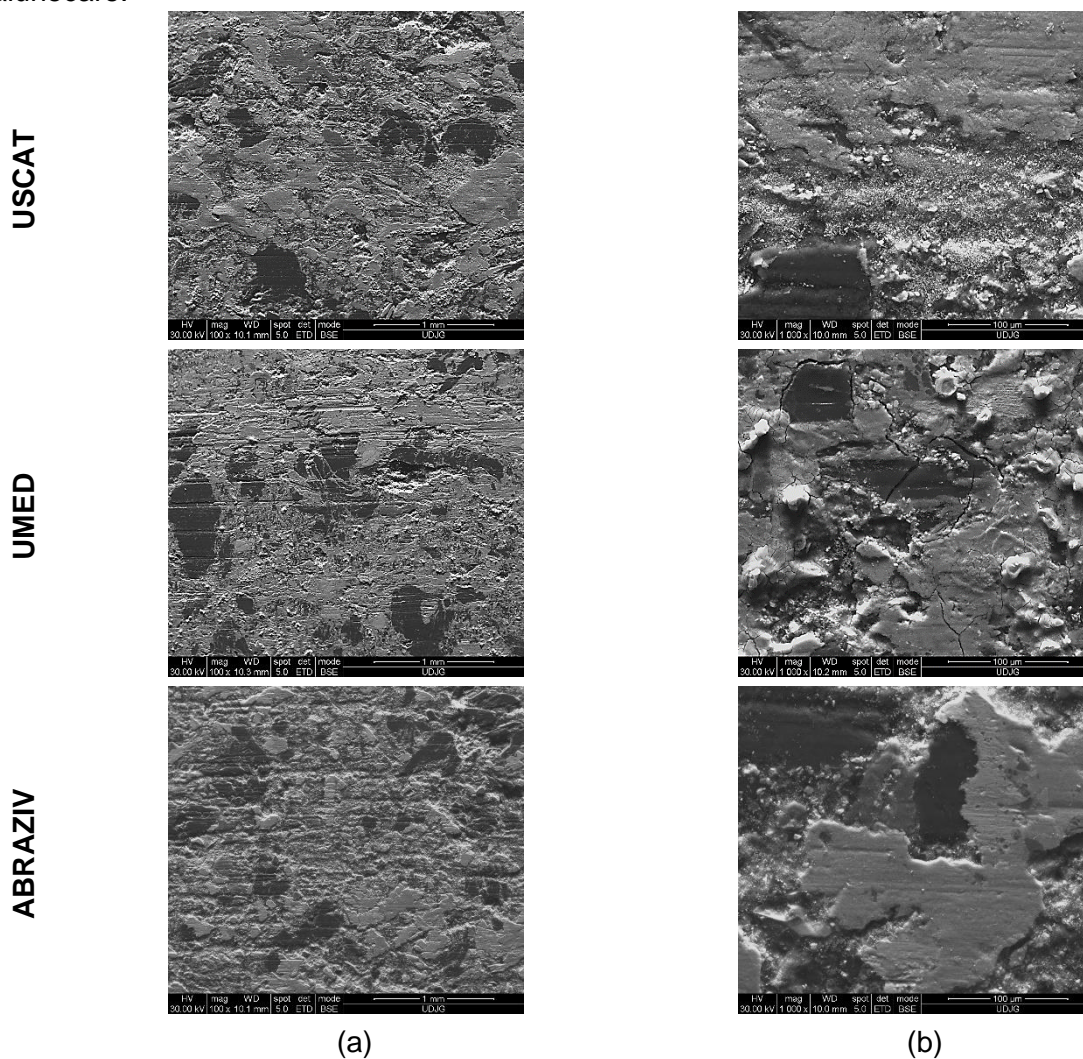


Figura 3.12 Imagini SEM ale urmelor de uzură a probelor BP-T: (a) 100 x și (b) 1000 x

În Figura 3.14 sunt prezentate imaginile SEM ale urmelor de uzură ale materialului de fricțiune BP-R pentru cele trei condiții de testare.

Analiza suprafețelor uzate ale materialului de fricțiune BP-R dezvăluie urme de uzură similare cu cele întâlnite în cadrul încercărilor realizate pe materialul de fricțiune BP-T, dar cu urme de abraziune mult mai fine. De asemenea platourile primare formate pe suprafața probelor sunt mult mai mari decât în cazul materialului de fricțiune BP-T (Figura 3.12). Aceste

observații sunt în corelație cu valorile medii ale pierderilor de masă prezentate în Figura 3.10. Si în cazul materialului BP-R se observă fisuri pe suprafața probelor testate în mediu umed.

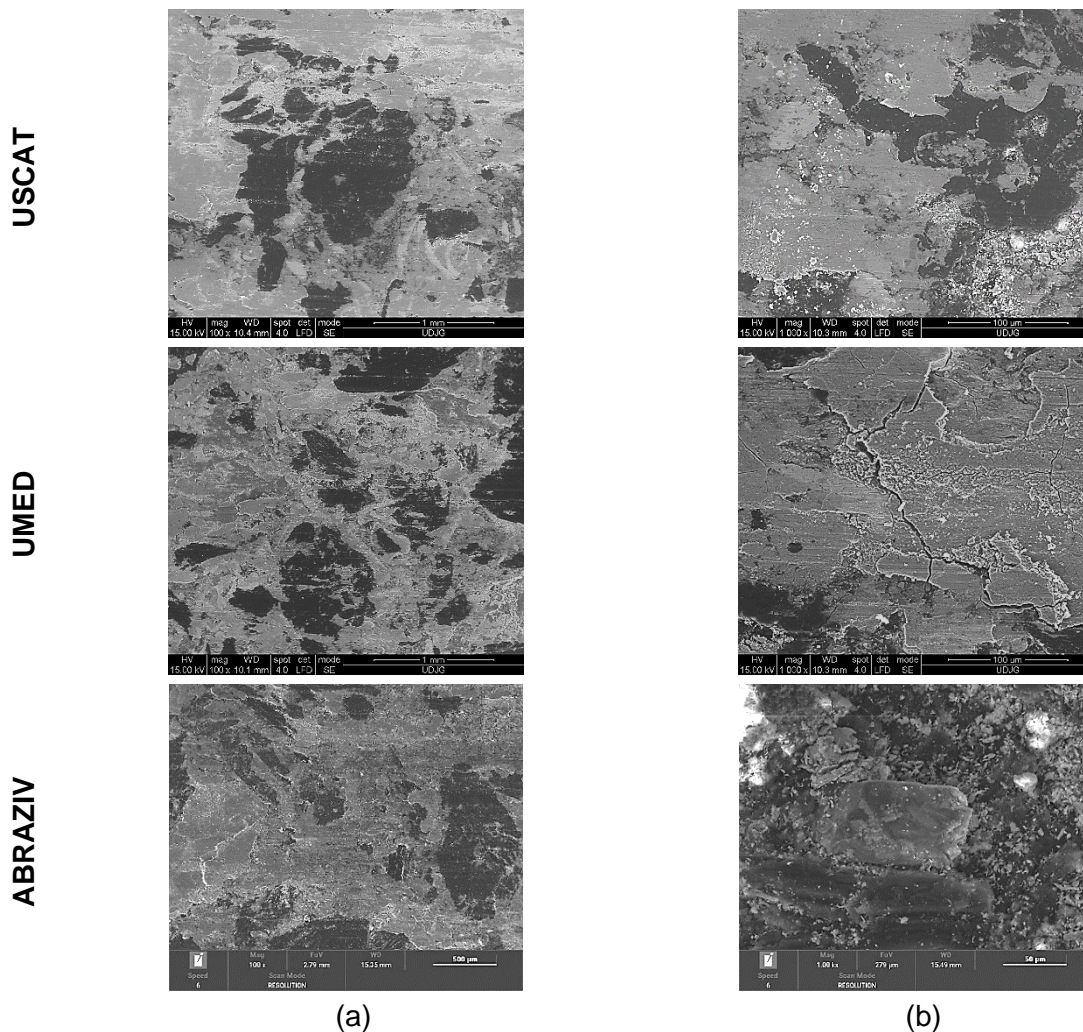


Figura 3.14 Imagini SEM ale urmelor de uzură a probelor BP-R: (a) 100 x și (b) 1000 x

În Figura 3.15 sunt date imaginile SEM ale urmelor de uzură pentru materialul BP-U pentru toate condițiile de testare. Și în cazul materialului BP-U se observă prezența uzurii de abraziune, dar cu o intensitate mult mai mică în comparație cu materialele, BP-T și BP-R. Similar cu celelalte două materiale analizate, acesta prezintă fisuri pe suprafața probelor testate în mediu umed.

În cazul tuturor materialelor testate principalul mecanism de uzură este uzura de abraziune, fenomenul este mult mai intens în cazul materialului BP-T. Pe lângă uzura de abraziune, este prezentă și uzura de adeziune care este intensificată datorită temperaturilor prezente în zona de contact dintre cele două corpuri.

Interesant este comportamentul celor trei materiale de fricțiune în urma testelor realizate în mediul umed. La o mărire de 1000X a suprafeței de frecare a celor trei materiale se poate observa apariția unor fisuri și chiar a spalling-ului (Figurile 3.12, 3.14 și 3.15 – linia din mijloc). Acesta este un mecanism de uzură ce constă în desprinderea unor "fulgi" de la suprafața materialului de fricțiune. În principiu acest fenomen apare în urma unor reacții chimice, în urma acțiunii unor forțe mecanice sau în urma fluctuațiilor termice. Dacă în cazul materialelor de fricțiune BP-T și BP-R aceste fisuri au apărut radial față de urma de uzură, în cazul materialului BP-U acestea sunt prezente mai intens în sensul canalelor de uzură.

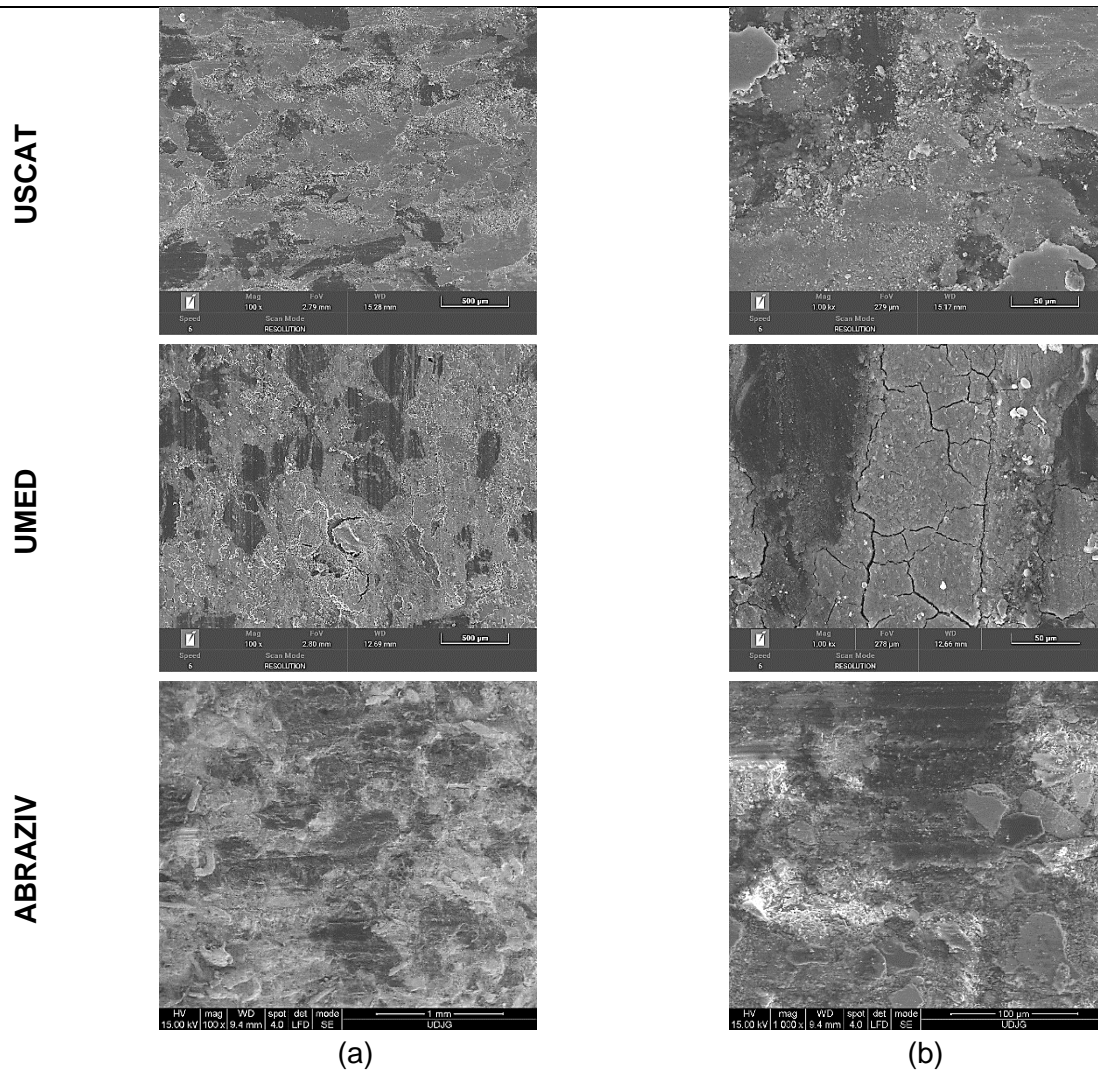


Figura 3.15. Imagini SEM ale urmelor de uzură a probelor BP-U: (a) 100 x și (b) 1000 x

3.2.1.4. Concluzii privind încercările materialelor de fricțiune în diferite medii (uscat, umed și cu particule abrazive)

- În cazul testelor realizate în mediu uscat, cea mai mică distanță de oprire a fost obținută în cazul materialului de fricțiune BP-R, urmat de materialul BP-U.
- Presiunea de frânare are o influență semnificativă asupra distanței de frânare, se observă că în cazul tuturor materialelor studiate distanțele de oprire la presiunea de 6 bar sunt mai mici decât distanțele de oprire la presiunea de 4 bar.
- Independent de condițiile de testare și de materialul testat, proba de pe exterior a avut o pierdere de masă mai mare decât cea montată pe interior, deoarece proba din exterior intră prima în contact cu discul de frână.
- Comportamentul la uzură al materialelor studiate a fost influențat de condițiile de testare (mediu uscat, umed sau cu particule abrazive).
- Principalele mecanisme de uzură identificate sunt uzura de abraziune (în cele mai dese situații vorbim de uzura de abraziune între trei corpuri), proces care este mult mai intens în cazul materialului de fricțiune BP-T și uzura de adeziune.

3.2.2. Studiu privind particulele eliminate în timpul frânării și eficiența elementelor de filtrare ale autovehiculelor rutiere

3.2.2.1. Condiții de testare privind analiza particulelor eliminate în timpul frânării și eficiența elementelor de filtrare ale autovehiculelor rutiere

Parametrii utilizați (de intrare – constanți și variabili) pentru realizarea determinărilor privind analiza particulelor eliminate în timpul frânării și eficiența elementelor de filtrare ale autovehiculelor rutiere, cât și parametri de ieșire (rezultați în urma testelor) sunt prezentați în Figura 3.16.

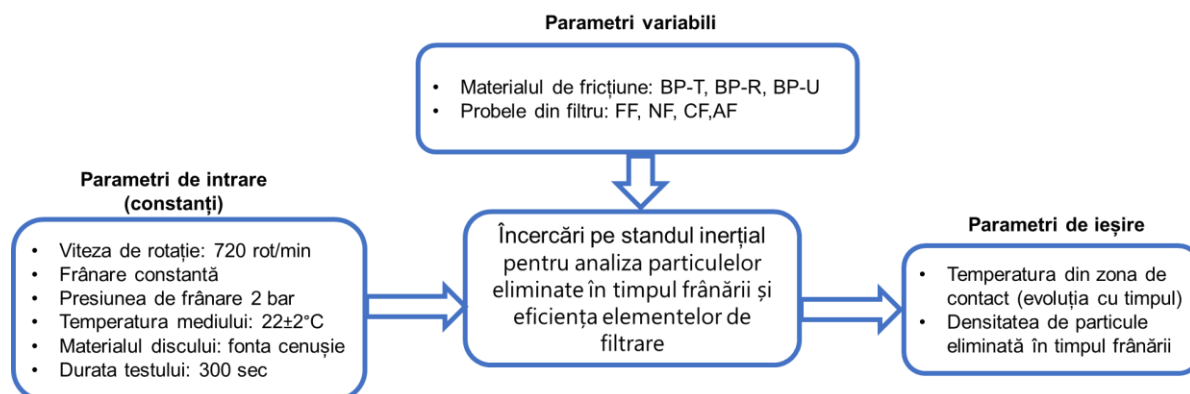


Figura 3.16. Parametrii de intrare (constanți și variabili) utilizați pentru analiza particulelor eliminate în timpul frânării și eficiența elementelor de filtrare ale autovehiculelor rutiere și cei rezultați în urma testării

Metodologia de testare în cazul testelor privind analiza particulelor eliminate în timpul frânării și eficiența elementelor de filtrare ale autovehiculelor rutiere a constat în:

Etapa I: Etapa de rulare în gol a dispozitivului timp de 1 minut. Aceasta etapă este necesară ca motorul să aibă suficient timp să ajungă la turația sa nominală și sistemele de măsurare să fie perfect funcționale.

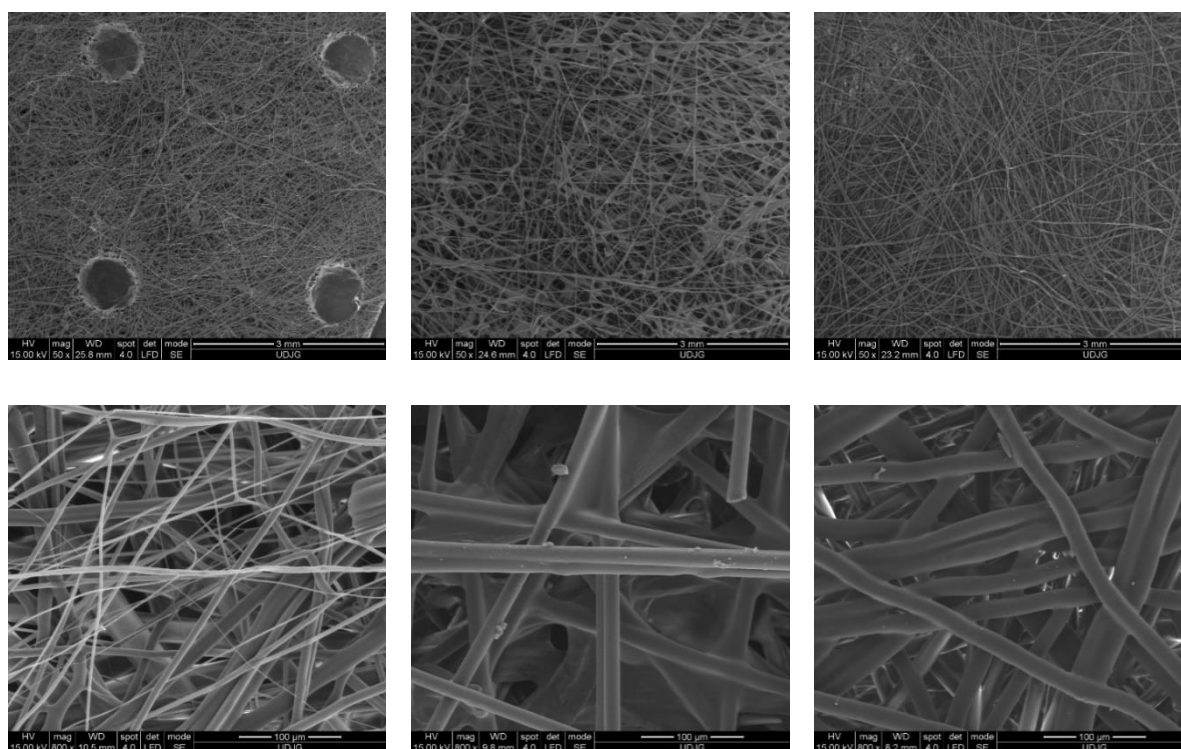
Etapa II: Testul propriu-zis care a constat din aplicarea unei singure frânări la o presiune de 2 bar, menținută constantă pe o perioadă de 300 de secunde.

Etapa III: Etapa de răcire a sistemului, unde frâna este eliberată, iar standul rulează în gol pentru ca elementele să se răcească în mod natural.

Au fost realizate trei teste pentru fiecare condiție studiată, iar rezultatele finale reprezintă media valorilor obținute în cadrul celor trei determinări. Pentru comparație au fost realizate teste fără filtru (test de referință), iar valorile obținute au fost considerate ca valori de referință.

3.2.2.2. Analiza SEM a filtrelor comerciale înainte de testare

Înainte de testare filtrele comerciale au fost supuse unei analize SEM. Imaginele SEM prezentate în Figura 3.17 (cu două mărituri: 50x - linia superioară și 800x - linia inferioară) prezintă microstructura, orientarea fibrelor și modul de aranjare/stratificare a fibrelor.



(a) NF

(b) CF

(c) AF

Figura 3.17. Imagini SEM ale filtrelor noi cu două mărituri: 50x (linia superioară) și 800x (linia inferioară): (a) NF, (b) CF și (c) AF

3.2.2.3. Rezultate privind densitatea de particule eliminate în timpul frânării și a temperaturii de la suprafața discului de frână

Evoluția densității de particule eliminate în timpul frânării și a temperaturii de la suprafața discului de frână cu timpul pentru materialul de fricțiune BP-T pentru cele 4 condiții studiate (FF, NF, CF și AF) este prezentată în Figura 3.18. Pentru o comparație mai ușoară valorile densității de particule eliminate pe durata testelor au fost normalizate.

În Figura 3.18 a sunt evidențiate cele trei etape de testare: I - Etapa de rulare în gol, II - Testul propriu-zis și III - Etapa de răcire a sistemului. În Figura 3.20 este prezentată evoluția densității de particule eliminate în timpul frânării și a temperaturii de la suprafața discului de frână cu timpul pentru materialul BP-R. Figura 3.21 prezintă evoluția temperaturii de la suprafața discului de frână și a valorilor densității de particule eliminate în timpul frânării în raport cu timpul, pentru materialul de fricțiune BP-U.

Analizând comportamentul probelor din filtru analizate, în cadrul tuturor testelor efectuate se poate observa că cele mai bune rezultate privind eficiența filtrelor de cabină au fost înregistrate în cazul filtrelor AF. Un rezultat neașteptat a fost obținut în cazul filtrelor de cabină CF (care conform specificațiilor producătorului sunt filtre superioare celor NF), acestea obținând rezultate mai slabe în ceea ce privește capacitatea de reținere a particule eliminate în timpul frânării comparativ cu filtrele NF.

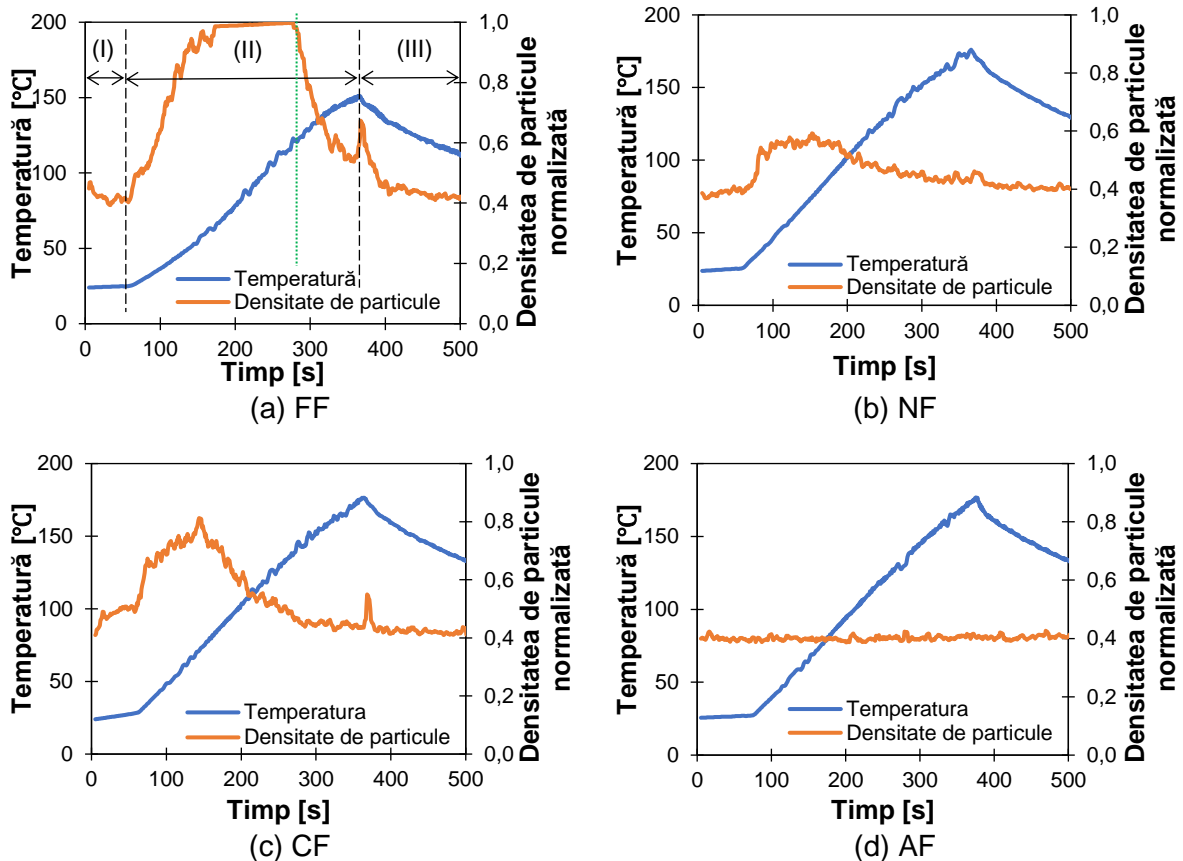


Figura 3.18. Evoluția densității de particule eliminate în timpul frânării și a temperaturii de la suprafața discului de frână cu timpul pentru materialul BP-T

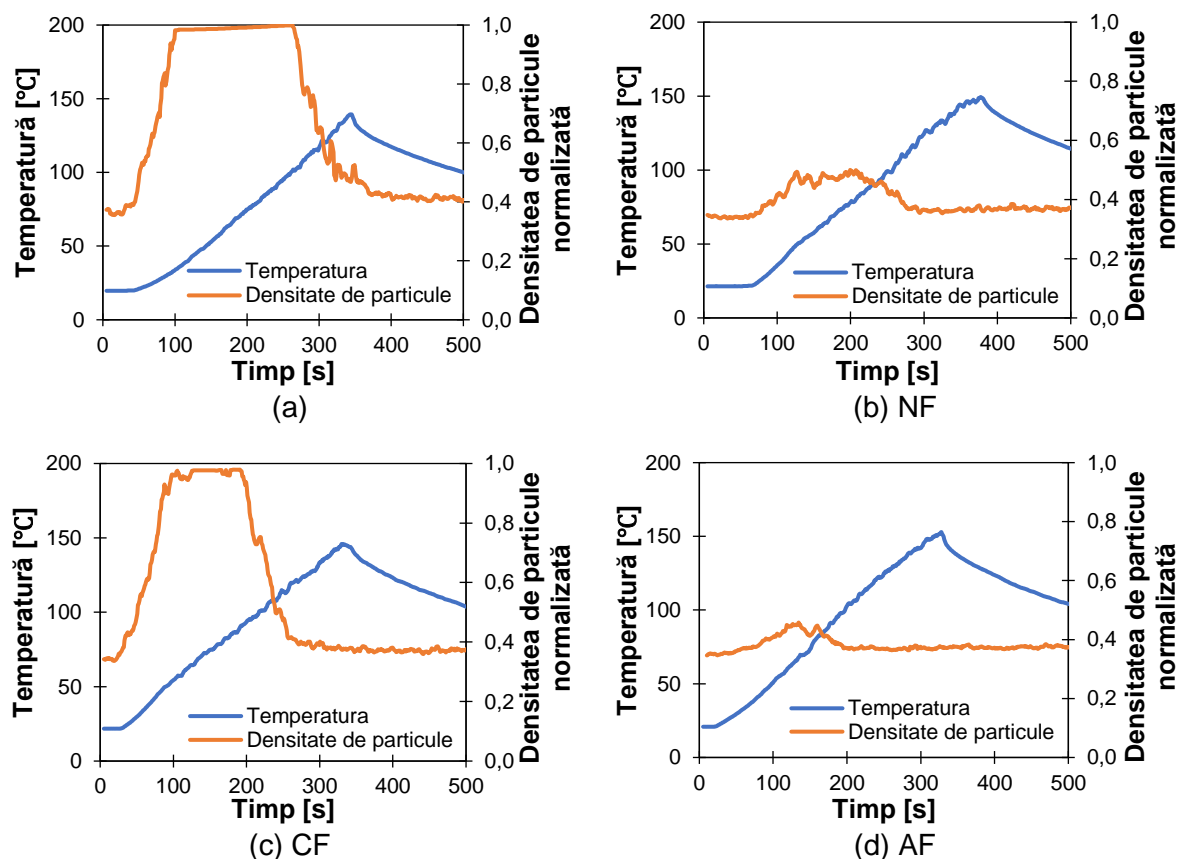


Figura 3.20. Evoluția densității de particule eliminate în timpul frânării și a temperaturii de la suprafața discului de frână cu timpul pentru materialul BP-R:

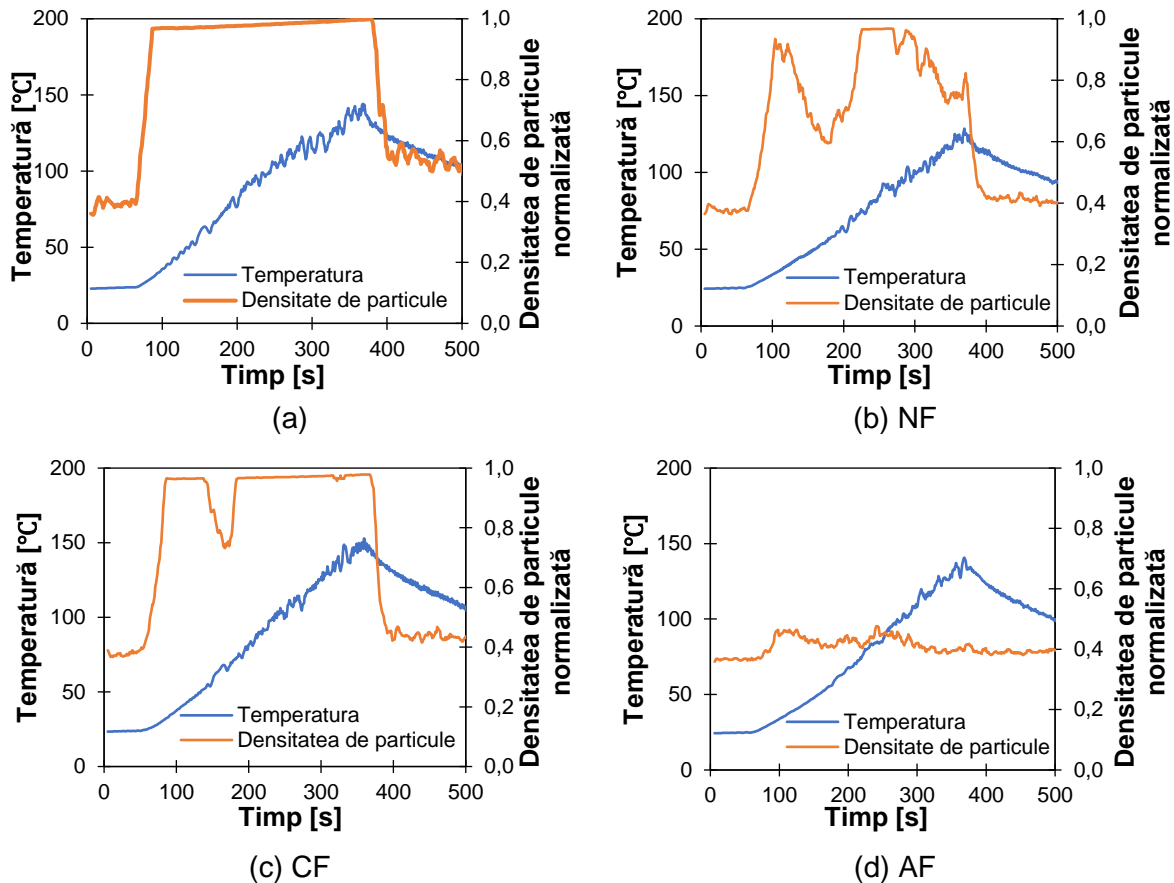


Figura 3.21. Evoluția densității de particule eliminate în timpul frânării și a temperaturii de la suprafața discului de frână cu timpul pentru materialul BP-U

3.2.2.4. Analiza filtrelor după testare pe baza microscopiei electronice de baleiaj (SEM) și a spectroscopiei de raze X cu dispersie de energie (EDAX)

După testare, filtrele comerciale au fost supuse unei analize SEM și EDAX. Imaginile SEM ale filtrelor după testare sunt prezentate în Figurile 3.22 (materialul BP-T), 3.23 (materialului BP-R) și 3.24 (materialul BP-U). În Figura 3.25 sunt date imaginile SEM unde sunt evidențiate măsurători ale particulelor eliminate în timpul frânării în cazul tuturor materialelor luate în studiu și pentru fiecare tip de filtru testat.

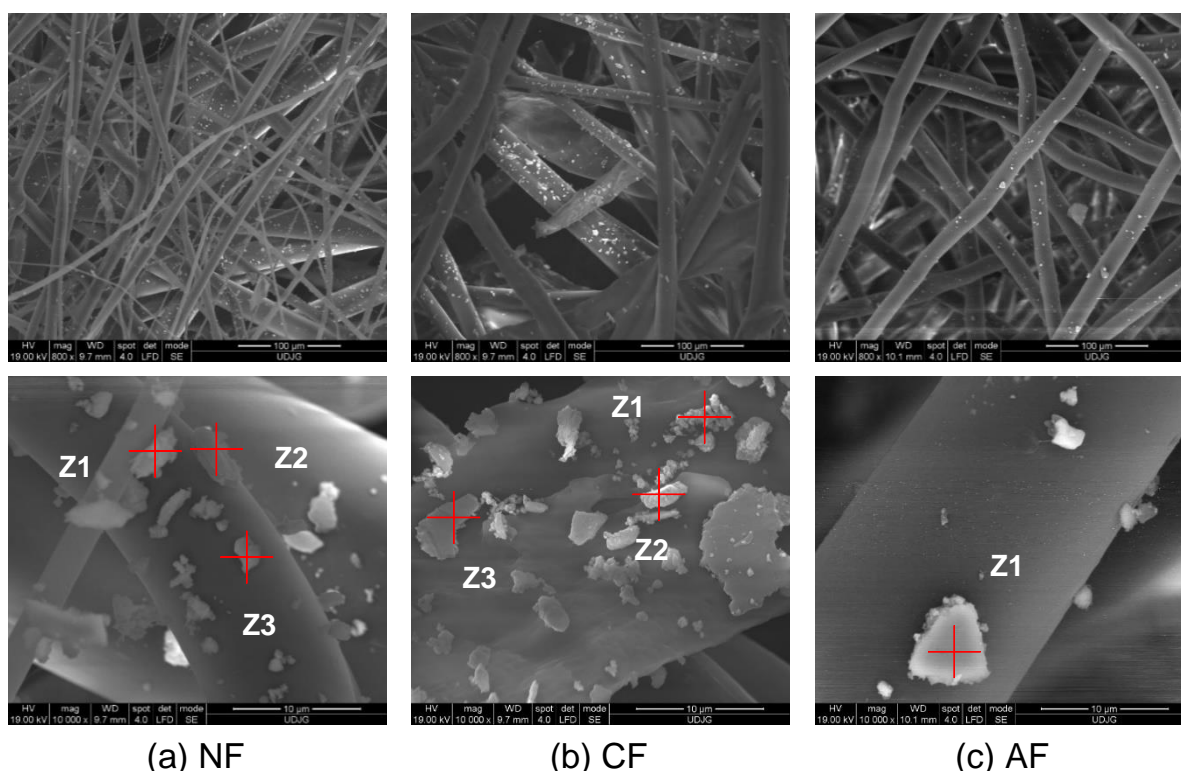
Analizând particulele reținute pe suprafața filtrelor în cazul celor trei materiale de fricțiune considerate în acest studiu, se observă că particulele întâlnite pe suprafața probelor din filtru testate au o dimensiune mai mică de $10\ \mu\text{m}$ ceea ce înseamnă că pot fi încadrate în categoria PM_{10} . O parte semnificativă din aceste particule sunt mai mici de $2,5\ \mu\text{m}$ și pot fi încadrate în categoria de particule $\text{PM}_{2,5}$.

Astfel, în ceea ce privește forma particulelor reținute de filtre se pot identifica două tipuri de particule:

- particule mici cu o formă neregulată (buretoase/poroase) ce pot fi încadrate în categoria particulelor $\text{PM}_{2,5}$,
- particule ce au formă neregulată plată (sub formă de fulgi) având dimensiuni ce pot fi încadrate în categoria de particule PM_{10} .

De asemenea se observă că particulele mici în anumite zone au tendința de a forma aglomerări de particule. Figura 3.22 prezintă imaginile SEM ale filtrelor după testare în cazul materialului BP-T. În cazul acestui material de fricțiune se pot observa cu precădere particule

plate, dar de asemenea se observă și niște zone cu aglomerări de particule cu dimensiuni mai mici.



(a) NF

(b) CF

(c) AF

Figura 3.22. Imagini SEM ale filtrelor după testare în cazul materialului BP-T cu două mărimi: 800x (linia superioară) și 10000x (linia inferioară): (a) NF, (b) CF și (c) AF

Pentru a înțelege care din constituenții chimici prezenți în materialul de fricțiune se îndepărtează preponderent de pe suprafața materialului de fricțiune a fost realizată o analiză EDAX în zonele marcate pe imaginile SEM mărite (1000x - linia inferioară) din Figura 3.22. O cuantificare a cantităților de elemente în zonele marcate este prezentată în Tabelele 3.2 (filtru NF), 3.3 (filtru CF) și 3.4 (filtru AF).

Tabelul 3.2. Analiza EDAX a zonelor marcate în Figura 3.22 a (filtru NF - BP-T)

Elemente (%)	C	O	S	Ba	Fe	Zr	Alte
Z1	45,45	12,77	1,28	0,95	9,05	29,30	1,2
Z2	83,30	1,95	-	-	-	13,31	1,44
Z3	53,34	10,59	0,79	-	6,48	28,16	0,64

Tabelul 3.3. Analiza EDAX a zonelor marcate în Figura 3.22 b (filtru CF - BP-T)

Elemente (%)	C	O	S	Ba	Fe	Zr	Alte
Z1	61,21	25,17	1,79	-	8,26	-	3,57
Z2	35,04	12,92	1,38	-	15,36	32,38	2,92
Z3	43,89	4,91	1,12	0,69	7,48	40,64	1,27

Tabelul 3.4. Analiza EDAX a zonei Z1 marcată în Figura 3.22 c (filtru AF - BP-T)

Elemente (%)	C	O	S	Ba	Fe	Zr	Alte
Z1	19,81	13,77	1,76	1,66	18,51	43,23	1,26

Pe baza analizei EDAX în zonele marcate au fost identificate următoarele elemente chimice în cazul testării materialului BP-T: C, O, S, Ba, Fe, Zr. Celelalte componente întâlnite

În cantități considerabil mai mici sunt Mg, Al, Si, Zn. Analiza chimică efectuată la nivelul diferitor tipuri de particule întâlnite pe startul superior al filtrului dezvăluie faptul că particulele de dimensiuni mai mari, care sunt sub formă plată au un conținut mai mare de Zr, în timp ce particulele foarte mici sunt o aglomerare de particule din Fe. Analizele EDAX realizate arată cantități de Fe mult mai mari decât au fost identificate în materialul de fricțiune BP-T (Tabelul 3.1), ceea ce dovedește că au fost desprinse particule de pe suprafața discului de frână.

Imaginile SEM ale filtrelor după testare în cazul materialului BP-R cu două mărimi: 800x (linia superioară) și 10000x (linia inferioară) sunt prezentate în Figura 3.23.

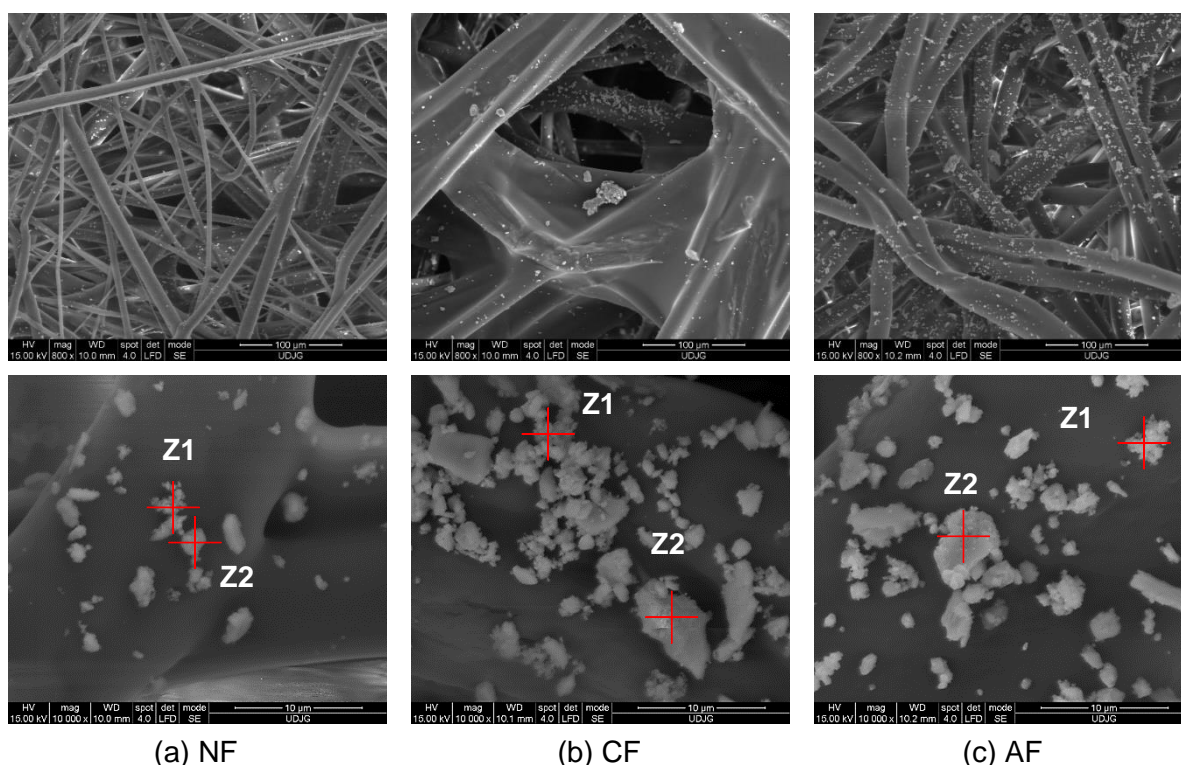


Figura 3.23. Imagini SEM ale filtrelor după testare în cazul materialului BP-R cu două mărimi: 800x (linia superioară) și 10000x (linia inferioară): (a) NF, (b) CF și (c) AF

Din Figura 3.23. se poate observa că particule eliminate de către materialul de fricțiune BP-R în cadrul testelor de frânare sunt predominant particule neregulate poroase de dimensiuni mici care au tendința de a forma aglomerări și doar în câteva locuri au fost identificate câteva particule mai mari, plate.

O cuantificare a cantităților de elemente în zonele marcate din Figura 3.23 sunt prezentate în Tabelele 3.5 (filtru NF), 3.6 (filtru CF), și 3.7 (filtru AF).

Conform analizei chimice prezentate în Tabelele 3.5, 3.6 și 3.7 se poate observa că principalul component chimic ce alcătuiește particulele eliminate în timpul frânării este Fe. Prezența O poate confirma doar prezenta unor oxizi de fier apăruți în urma expunerii Fe în aer liber. Ca și în cazul materialului de fricțiune BP-T prezența unei cantități mai mari de Fe reținută de filtre, dovedește o deteriorare mai mare a discului de frână datorită particulelor care rulează în contact și accentuează uzura de abraziune.

Tabelul 3.5. Analiza EDAX a zonelor marcate în Figura 3.23 a (filtru NF - BP-R)

Elemente (%)	C	O	Si	Ca	Mn	Fe	Alte
Z1	63,81	10,78	0,18	0,46	-	24,26	0,51
Z2	45,09	25,49	0,71	0,52	-	27,30	0,89

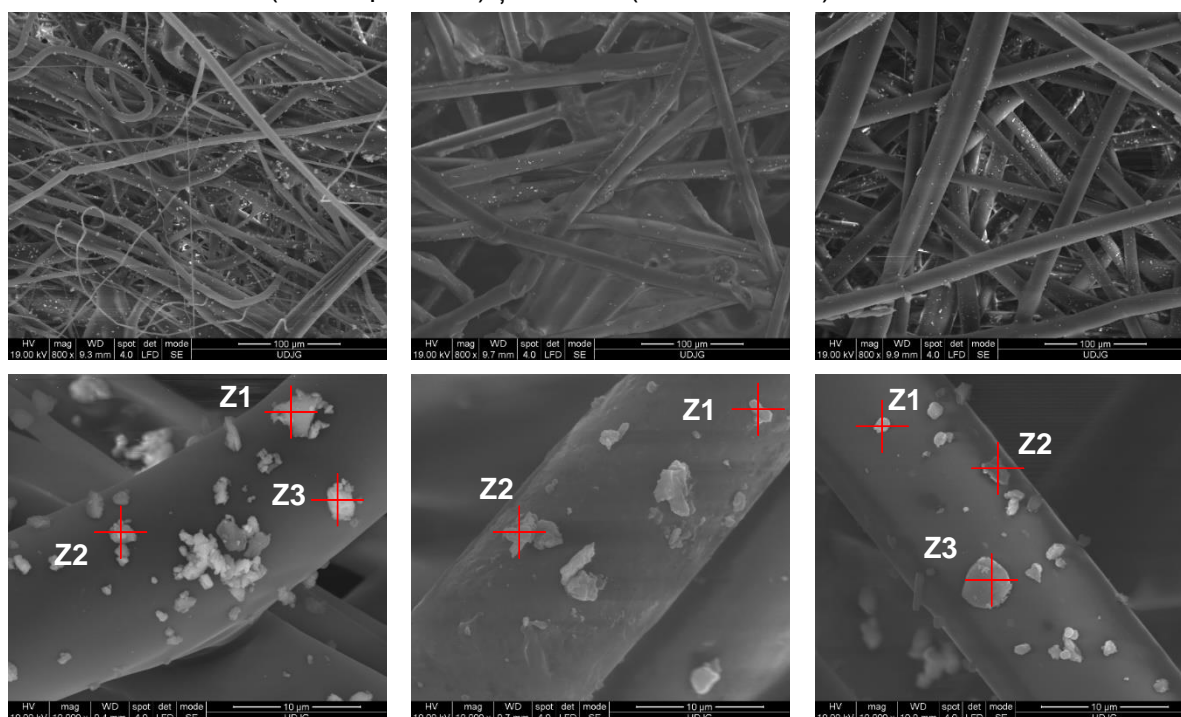
Tabelul 3.6. Analiza EDAX a zonelor marcate în Figura 3.23 b (filtru CF - BP-R)

Elemente (%)	C	O	Si	Ca	Mn	Fe	Alte
Z1	31,84	4,01	0,44	1,09	1,34	60,85	0,43
Z2	28,38	2,97	0,95	0,60	1,42	64,96	0,72

Tabelul 3.7. Analiza EDAX a zonelor marcate în Figura 3.23 c (filtru AF - BP-R)

Elemente (%)	C	O	Si	Ca	Mn	Fe	Alte
Z1	48,69	22,17	0,77	1,21	0,53	25,84	0,79
Z2	28,24	23,75	1,45	1,10	1,05	43,37	1,04

Figura 3.24 prezintă imagini SEM ale filtrelor după testare în cazul materialului BP-U cu două mărituri: 800x (linia superioară) și 10000x (linia inferioară).



(a) NF

(b) CF

(c) AF

Figura 3.24. Imagini SEM ale filtrelor după testare în cazul materialului BP-U cu două mărituri: 800x (linia superioară) și 10000x (linia inferioară): (a) NF, (b) CF și (c) AF

O cuantificare a cantităților de elemente în zonele marcate din Figura 3.24 sunt prezentate în Tabelele 3.8 (filtru NF), 3.9 (filtru CF), și 3.10 (filtru AF).

Tabelul 3.8. Analiza EDAX a zonelor marcate în Figura 3.24 a (filtru NF - BP-U)

Elemente (%)	C	O	S	Ba	Fe	Zr	Alte
Z1	48,48	4,19	1,21	0,63	9,79	33,61	2,09
Z2	60,04	6,97	1,02	-	3,87	27,15	0,95
Z3	44,78	14,88	1,33	-	11,59	25,34	2,08

Tabelul 3.9. Analiza EDAX a zonelor marcate în Figura 3.24 b (filtru CF - BP-U)

Elemente (%)	C	O	S	Ba	Fe	Zr	Alte
Z1	49,49	7,62	1,42	-	5,25	35,90	0,32
Z2	30,66	14,11	2,18	-	15,52	34,78	2,75

Tabelul 3.10. Analiza EDAX a zonelor marcate în Figura 3.24 c (filtru AF - BP-U)

Elemente (%)	C	O	S	Ba	Fe	Zr	Alte
Z1	34,66	1,27	2,03	-	6,53	52,49	3,02
Z2	64,48	3,81	3,33	1,89	19,27	-	7,22
Z3	47,48	9,93	1,16	-	11,02	28,12	2,29

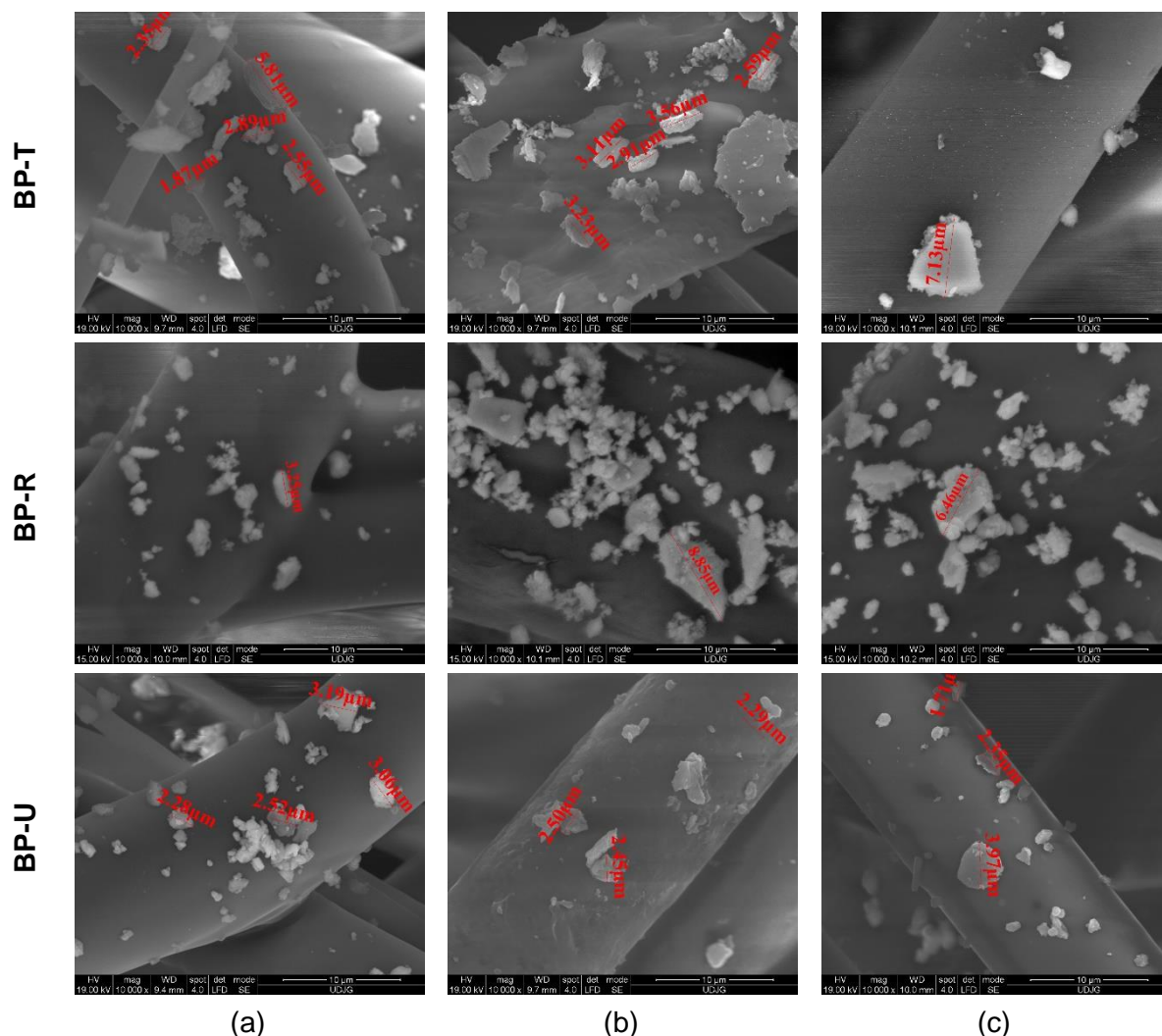


Figura 3.25. Imagini SEM unde sunt evidențiate dimensiunile particulelor eliminate în timpul frânării: (a) NF, (b) CF și (c) AF

Particulele eliminate în urma testelor efectuate cu materialul de fricțiune BP-U sunt predominant plate fiind asemănătoare cu particulele observate în cadrul testelor efectuate cu materialul de fricțiune BP-T, dar cu o dimensiune relativ mai mică. Cu toate acestea particule fine, cu forme neregulate sunt și ele prezente, dar au fost întâlnite în special în cazul testelor efectuate cu proba de filtru NF. Conform analizei chimice acestea au o concentrație ridicată de Fe, în timp ce analiza chimică efectuată asupra particulelor plate arată zone cu conținut de Zr.

Cel mai periculos aspect identificat pe baza analizei efectuate, este faptul că în cazul tuturor probelor analizate se observă tendința particulelor fine de a adera la suprafața particulelor de dimensiuni mai mari, acest lucru fiind un real pericol în cazul inhalării lor [234].

3.2.2.5. Concluzii privind încercările de filtrare

- În cadrul determinărilor a fost posibilă identificarea unor intervale de temperatură critică, adică intervale de temperatură în care materialul de fricțiune elimină cea mai mare densitate de particule în timpul frânării (când filtrul nu este capabil să rețină toate particulele). Astfel, cele mai mici intervale de temperatură critică au fost identificate în cazul filtrului AF pentru materialele de fricțiune BP-R (40-60°C) și BP-U (25-50°C), iar cel mai mare interval a fost observat în cazul filtrelor NF și CF pentru materialul de fricțiune BP-U (25 - 140°C),
- Analiza SEM și EDAX a evidențiat că o mare parte din particulele eliminate în timpul determinărilor efectuate cu materialele de fricțiune BP-T și BP-U au formă plată și colțuri ascuțite în timp ce în cazul materialului de fricțiune BP-R acestea sunt de mici dimensiuni.
- Microscopia electronică cu baleiaj indică faptul că în cazul tuturor materialelor de fricțiune analizate (BP-T, BP-R, BP-U) dimensiunea particulelor eliminate în timpul frânării se încadrează în categoria PM₁₀, și o mare parte dintre aceste particule se încadrează în categoria PM_{2.5}.
- Cea mai mare cantitate de particule fine (PM_{2.5}) a fost identificată în cazul materialului de fricțiune BP-R.
- Analiza chimică a evidențiat că particulele eliminate în timpul frânării au o concentrație mare de compuși metalici, precum Fe și Zr. A fost observată o tendință a particulelor fine cu conținut de Fe de a adera la particulele mai mari cu conținut de Zr, considerate periculoase în cazul inhalării lor.
- Comparativ, în ceea ce privește eficiența filtrelor de cabină ale autovehiculelor rutiere cea mai bună capacitate de filtrare a fost obținută în cazul filtrului AF, în timp ce în cazul filtrului CF au fost obținute cele mai slabe rezultate.

3.3 Rezultate privind încercările tribologice

3.3.1. Condiții de încercare privind testele tribologice

Parametrii de încercare (constanți și variabili) utilizați, cât și parametrii care se obțin în urma testelor tribologice realizate pe cele două tipuri de tribometre sunt prezentați în Figurile 3.26 (pin-pe-disc de frână real) și 3.27 (tribometrul CETR-UMT-2).

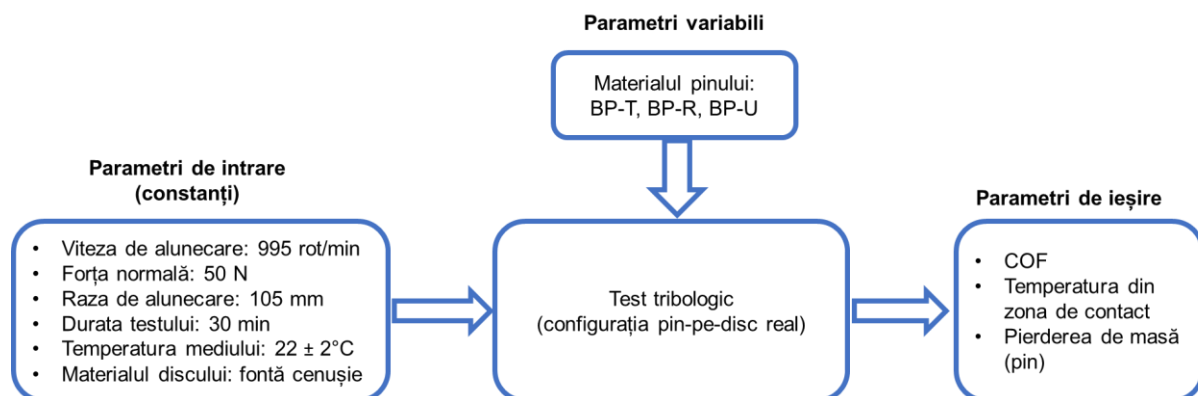


Figura 3.26. Parametrii de intrare, variabili și de ieșire în cazul testelor tribologice pe mașina de testare pin-pe-disc de frână real

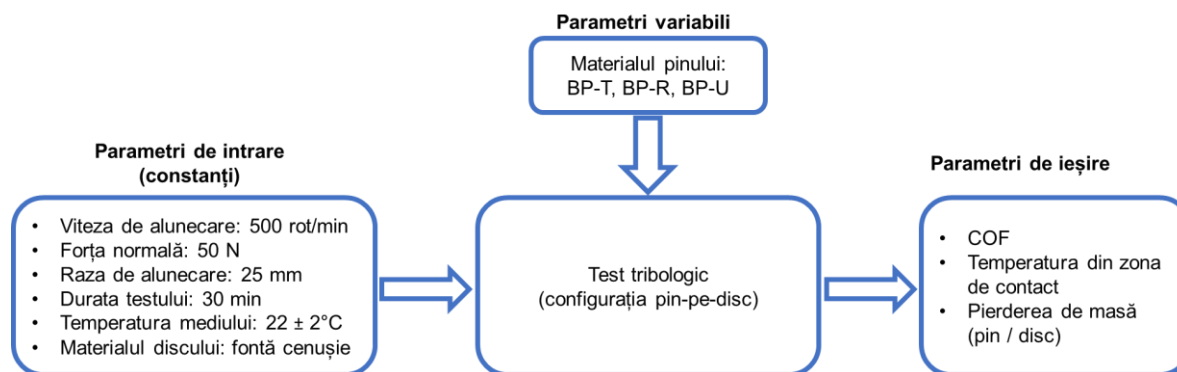


Figura 3.27. Parametrii de intrare, variabili și de ieșire în cazul testelor tribologice pe tribometrul CETR-UMT-2

3.3.2. Rezultate privind evoluția coeficientului de frecare, temperaturii și a pierderii de masă

1. Teste tribologice pe standul pin-pe-disc real

Evoluția valorilor coeficientului de frecare și a temperaturii pe durata testelor este reprezentată în Figura 3.28. Rezultatele prezintă o evoluție tipică a coeficientului de frecare, cu o creștere rapidă a valorilor coeficientului de frecare în prima parte a testului, urmată de o stabilizare a acesteia pe toată durata testului.

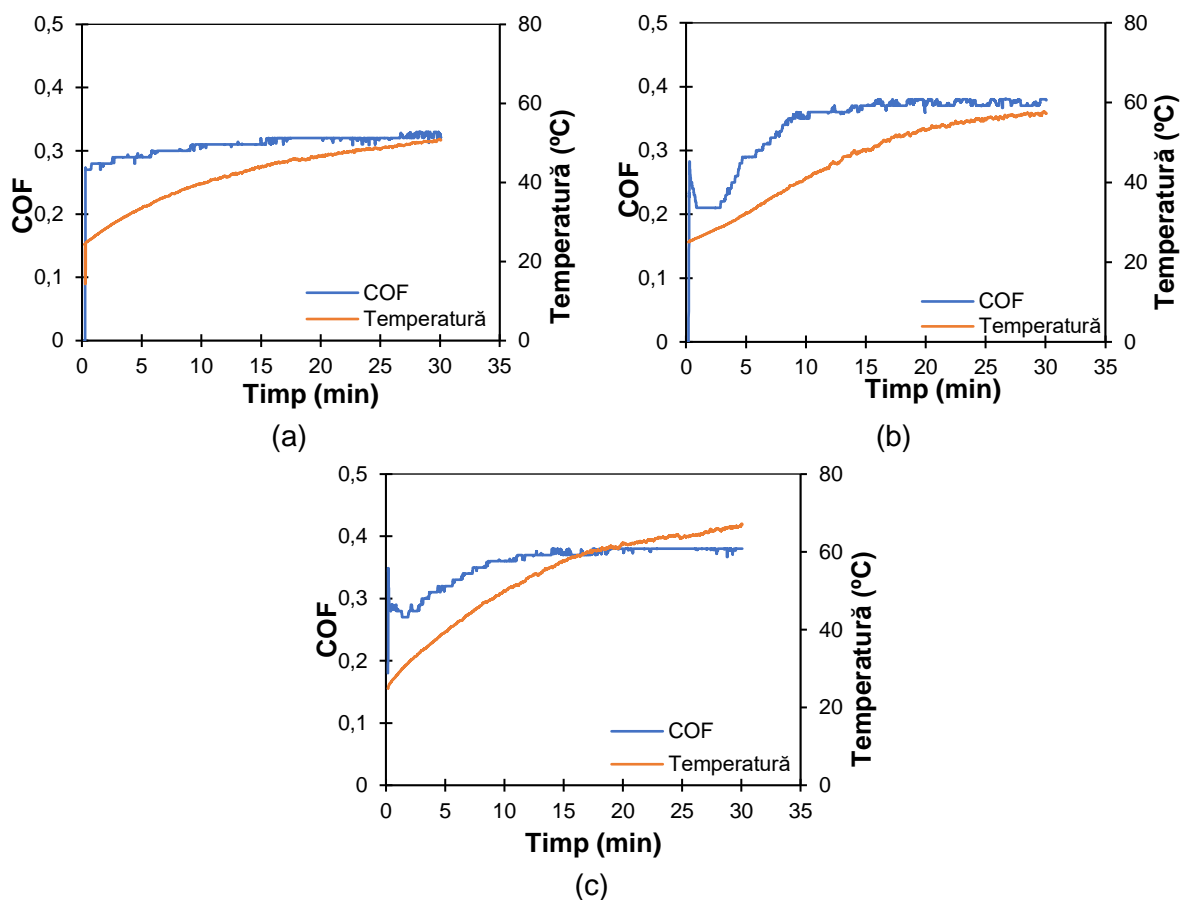


Figura 3.28. Evoluția COF și a temperaturii cu timpul: (a) BP-T, (b) BP-R și (c) BP-U [237]

Valoarea medie a coeficientului de frecare din zona stabilă a fiecărei probe în parte este prezentată în Figura 3.29. În Figura 3.30 este prezentată pierderea de masă pentru toate materialele luate în studiu.

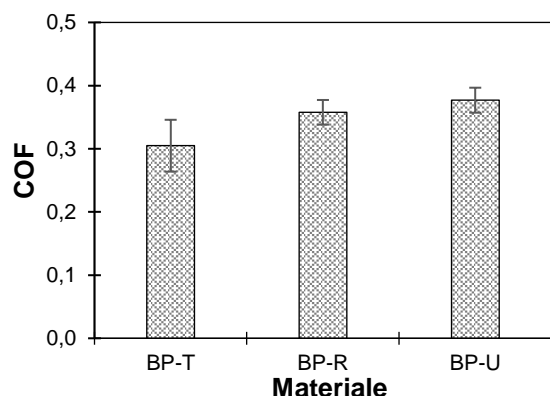


Figura 3.29. Valoarea medie a coeficientului de frecare funcție de materialele de fricțiune (configurația pin-pe-disc real) [237]

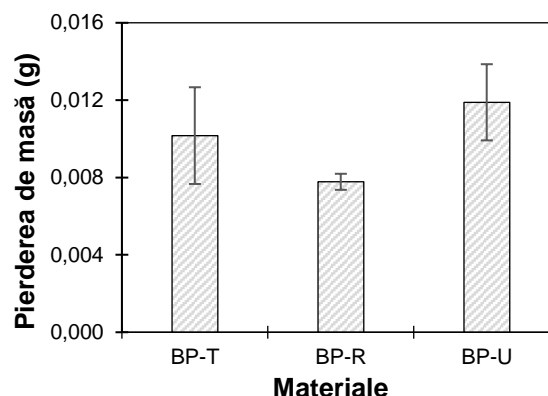


Figura 3.30. Pierderea de masă funcție de materialele de fricțiune (configurației pin-pe-disc real) [237]

În urma rezultatelor obținute se poate spune că pierderea de masă este în concordanță cu duritatea materialelor, deoarece în general o valoare mare în cazul durității materialelor indică o pierdere de masă mică.

II. Teste tribologice pe tribometrul CETR-UMT-2

Evoluția coeficientului de frecare în raport cu timpul de alunecare pentru materialele luate în studiu în cazul determinărilor realizate pe tribometrul CETR-UMT-2 este dată în Figura 3.31.

În general în cazul tuturor probelor analizate se observă o evoluție tipică a coeficientului de frecare cu o creștere rapidă a valorilor COF în etapa de inițiere a testului (perioada de running-in), apoi se poate observa o stabilizare a valorilor COF (steady-stat regime). Valorile medii ale COF funcție de materialele de fricțiune analizate sunt prezentate în Figura 3.32.

În figura 3.33 este prezentată evoluția pierderii de masă atât pentru cele trei materialele de fricțiune comerciale analizate (pin), cât și pentru disc. Valorile prezentate în figura 3.33 sunt valorile medii a cinci încercări.

Se poate observa că pierderea de masă în cazul materialelor BP-T și BP-R a fost similară (Fig. 3.33 a). Din păcate materialul BP-T a dus la o deteriorare prin uzură a mai mare a discului (Figura 3.33 b), față de materialul BP-R care a fost mai blând cu materialul discului de frână. O pierdere de masă mai mare a fost obținută în cazul materialului BP-U, dar acesta este mai prietenos cu discul. În acest caz a fost obținută cea mai mică pierdere de masă a discului. Cel mai bun rezultat în ceea ce privește pierderea de masă a fost obținut în cazul cuplului de materiale BP-R/disc de fontă cenușie. Pierderea de masă este în perfectă corelație cu duritatea materialelor (Figura 3.2).

Se poate observa că rezultatele obținute în cadrul testelor realizate pe tribometrul CETR-UMT-2 sunt diferite față de rezultatele obținute în cadrul testelor efectuate pe standul pin pe disc real de frână. Chiar dacă în privința valorilor medii ale COF nu sunt diferențe semnificative, în cadrul evoluției valorilor COF apar câteva diferențe. Deși compoziția chimică a discurilor utilizate în ambele teste nu diferă foarte mult, dimensiunea acestora pare să aibă influențe semnificative. Pe de alta parte, Wahlström et. al. [247] consideră că în cazul discurilor de frână etapa de inițiere a testului tribologic (evoluția COF pe perioada de running-in) este

mult mai importantă decât regimul stabil, deoarece simulează destul de bine o frânare reală. Explicația se bazează pe faptul că frânarea nu durează foarte mult și fiecare frânare este făcută cu presiune diferită la nivelul plăcuțelor de frână.

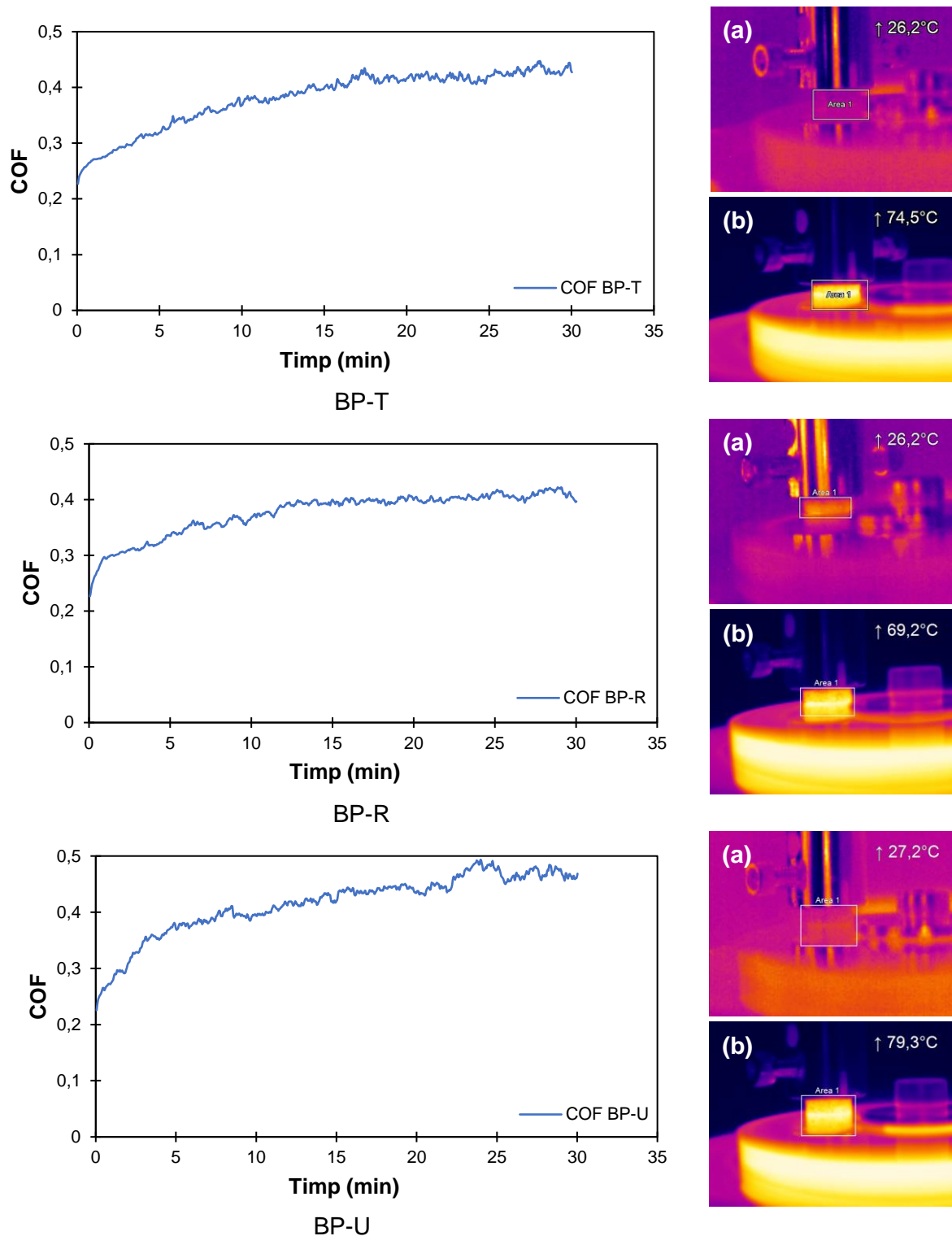


Figura 3.31. Evoluția coeficientului de frecare cu timpul de alunecare și variația temperaturii (a - temperatura inițială și b - temperatura finală) pentru materialele analizate pe tribometrul CETR-UMT-2

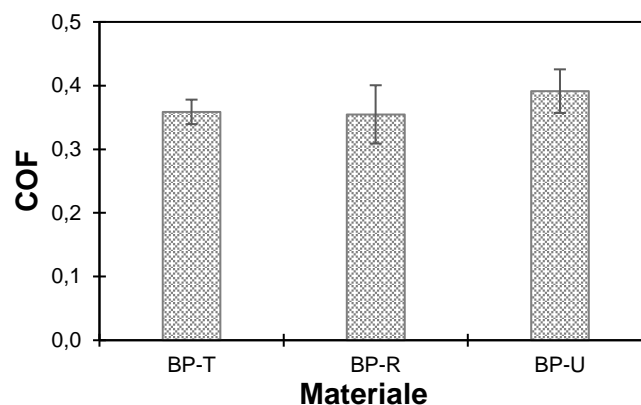


Figura 3.32. Valorile medii ale coeficientului de frecare funcție de materialele de fricțiune (tribometrul CETR-UMT-2)

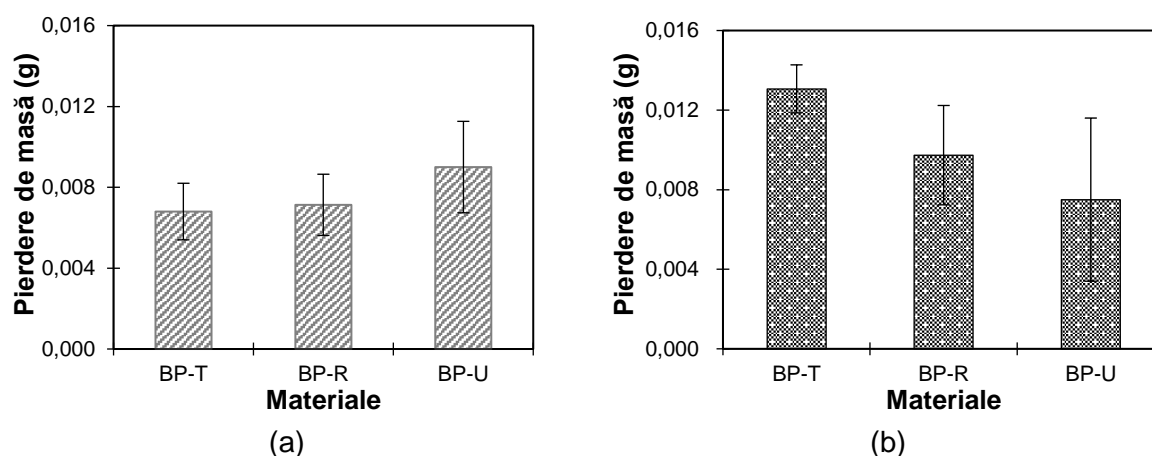


Figura 3.33. Valorile medii ale pierderii de masă funcție de materialele de fricțiune (tribometrul CETR-UMT-2): (a) pin; (b) disc

3.3.3. Analiza suprafețelor uzate pe baza microscopiei electronice de baleiaj (SEM) și a spectroscopiei de raze X cu dispersie de energie (EDAX)

1. Teste tribologice pe standul pin-pe-disc real

În vederea obținerii unor informații privind mecanismele de uzură a cuplurilor de materiale studiate cu ajutorul configurației pin-pe-disc real, au fost realizate analize cu ajutorul microscopiei SEM. Imaginile SEM ale urmelor de uzură a materialelor studiate cu două mărimi (90 x și 200 x) sunt prezentate în Figura 3.34. Direcțiile de alunecare sunt indicate prin săgeți pe imaginile microscopice.

Se pot observa canale aliniate cu direcția de alunecare în toate cazurile studiate, care sunt atribuite uzurii de abraziune. Din imaginile SEM cu o mărire de 90x se observă că mai puțin vizibile sunt canelele în cazul materialului BP-R (Figura 3.34b) și cu adâncimi mai mici, în timp ce în cazul materialului BP-U se observă mai multe canale pe toată suprafața urmei de uzură. Abraziunea în cazul materialului BP-U, pare a fi o combinație între micro-brăzdare și micro-așchiere. Uzura de abraziune este mai puțin pronunțată în cazul materialului BP-R, ceea ce este în perfectă corelație cu rezultatele obținute pentru pierderea de masă (Figura 3.30). De asemenea se observă formarea unor goluri care se datorează desprinderii de particule, în general acest lucru se întâmplă în cazul componentelor chimici mai duri. Aceste particule pot avea un efect distructiv asupra discului de frână (din păcate în cazul discului real nu a fost posibilă analizarea urmei de uzură cu ajutorul microscopiei SEM).

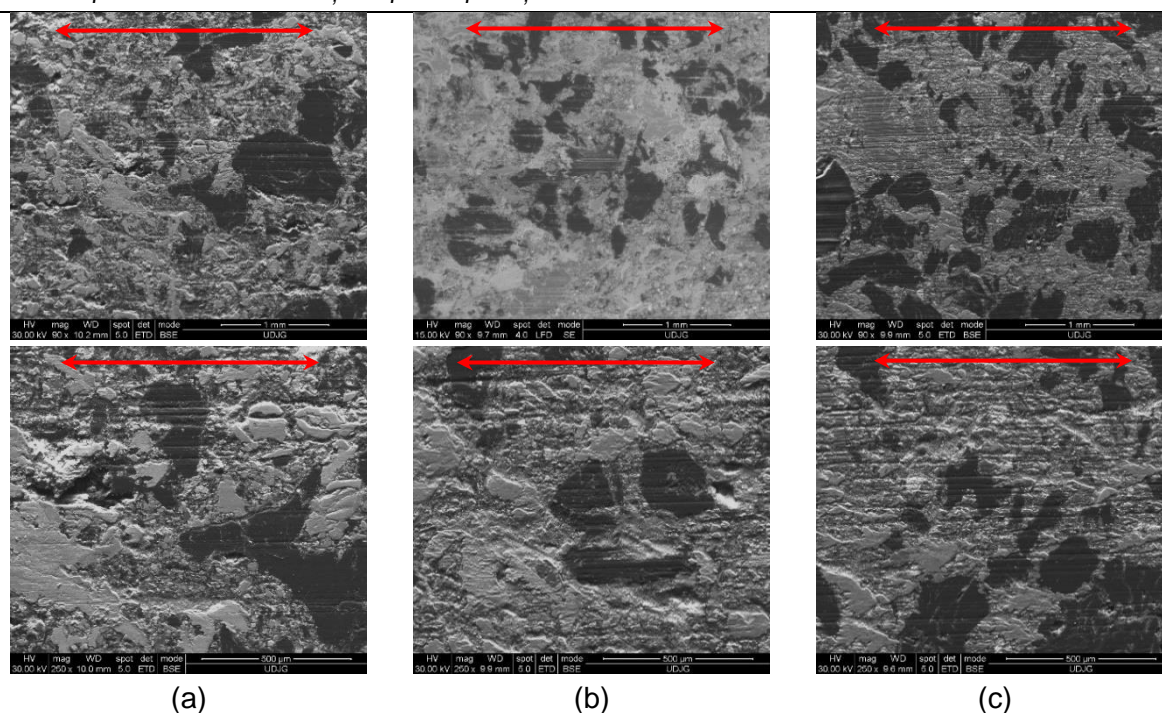


Figura 3.34. Imagini SEM ale urmelor de uzură pe suprafața pinilor (materialelor de fricțiune) în cazul configurației pin-pe-disc real: (a) BP-T, (b) BP-R și (c) BP-U [237]

Pe suprafețele urmelor de uzură au fost observate două tipuri de zone: o zonă mai înaltă, ce pare a fi zona reală de contact a materialului de fricțiune cu contra piesa, și o zonă mai joasă. Zonele mai înalte de la suprafața materialului de fricțiune poartă denumirea de platouri principale (platouri primare) și reprezintă zona reală de contact dintre materialul de fricțiune și discul de frână. Din imaginile SEM prezentate în Figura 3.34 se observă mai multe platouri primare pe suprafața urmelor de uzură a materialelor de fricțiune BP-T și BP-R comparativ cu BP-U. Aceste platouri primare acționează ca o barieră asupra eliminării din zona de contact a particulelor fine ce se desprind atât de la suprafața materialului de fricțiune cât și de la suprafața contra-pieseii, deoarece acestea au tendința de a forma aglomerări la baza platourilor primare. În momentul în care aceste particule tind să adere unele la suprafața celorlalte, cu ajutorul temperaturii din zona de contact începe procesul de formare al platourilor secundare (prezența mecanismului de uzură prin adeziune) [60,71,86]. Platourile secundare sunt compuse din zone cu aglomerări de particule compactate și au ca efect o creștere a valorii coeficientului de frecare [129,253]. Din Figura 3.34 c se observă formarea unor platouri secundare mai mari în cazul materialului BP-U, față de celelalte materiale studiate. Acest lucru este dovedit și de valorile coeficientului de frecare ce au fost obținute în cadrul testelor tribologice efectuate pe standul pin-pe-disc real, unde valoarea maximă a coeficientului de frecare a fost obținută în cazul probelor BP-U (0,38 – Figura 3.29). Formarea platourilor primare și secundare este un proces dinamic, în funcție de compoziția chimică a materialelor de fricțiune.

II. Teste tribologice pe tribometrul CETR-UMT-2

Imaginile SEM ale urmelor de uzură a materialelor de fricțiune studiate (cu două mărimi - 90 x și 200 x) în urma testelor tribologice realizate pe tribometrul CETR-UMT-2 sunt prezentate în Figura 3.35. Se observă că suprafețele de uzură a celor trei materiale de fricțiune sunt extrem de neregulate. Și în cazul acestor teste tribologice sunt identificate pe suprafețele uzate canale de uzură aliniate cu direcția de alunecare specifice uzurii de abraziune. În cazul

materialului BP-U canalele de uzură sunt mult mai proeminente, indicând o uzură mai accentuată (lucru confirmat și de valoarea medie a pierderii de masă înregistrată de acest material de fricțiune – Figura 3.33a). Platourile specifice (primare și secundare) ce se formează în cazul materialelor de fricțiune pot fi identificate și în acest caz. Platourile primare mai mari observate în cazul materialului de fricțiune BP-U se datorează unei cantități mai mari de componente metalice prezente în compoziția materialului de fricțiune.

Platouri secundare sunt foarte bine compactate în spatele platourilor primare. Spalling-ul este și el de asemenea prezent, dar apare mai evident doar în cazul probelor BP-T și BP-R [164]. În zonele joase de la suprafața materialului de fricțiune se formează aglomerări de particule, tipice mecanismelor de uzură identificate (adeziune).

Imaginile SEM ale urmelor de uzură ale discurilor utilizate în cadrul testelor realizate pe tribometrul CETR-UMT-2 sunt prezentate în Figura 3.36. Analiza SEM a urmelor de uzură ale discurilor arată că cea mai mare uzură este prezentă în cazul discului utilizat cu materialul de fricțiune BP-T, iar cea mai mică în cazul discului utilizat cu materialul de fricțiune BP-U. Particulele prezente la suprafața discului utilizat cu materialul de fricțiune BP-T dar și valorile medii ale pierderilor de masă (Figura 3.33b) susțin acest lucru. Ca și în cazul materialului de fricțiune, principalul mecanism de uzură este abraziunea. O analiză mai atentă a urmelor de uzură indică un tip particular de uzură de abraziune și anume brăzderea (proces ce constă în deformarea plastică a suprafeței discului) [164]. Pe lângă aceasta, se pot observa la suprafața discurilor zone din care sunt desprinse părți din material. Acest mecanism de uzură poartă denumirea de exfoliere (peeling) și se manifestă prin desprinderea straturilor de la suprafața discului datorită forțelor de adeziune puternice, sau, în caz particular, datorită stresului mecanic repetat. În formă accentuată acesta poate distruge integritatea materialului [149].

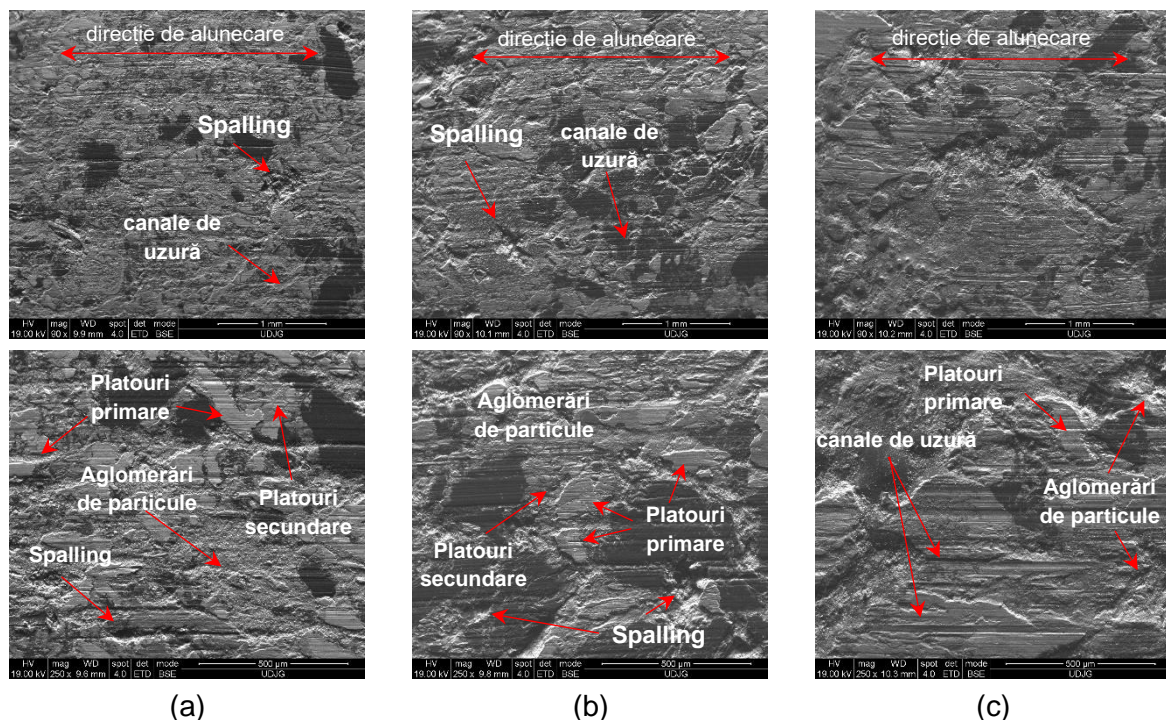


Figura 3.35. Imagini SEM ale urmelor de uzură pe suprafața materialelor de fricțiune în cazul configurației pin-pe-disc (tribometrul CETR-UMT-2): (a) BP-T, (b) BP-R și (c) BP-U [237]

Uzura de adeziune identificată la nivelul discurilor utilizate în cadrul determinărilor este confirmată și de aderarea materialului de fricțiune la suprafața discului. În cazul discului utilizat în cadrul determinărilor efectuate asupra materialului de fricțiune BP-R se poate observa

aparitia spalling-ului (manifestat prin desprinderea unei bucăți din material de la suprafața discului), proces ce a condus la formarea unor cavități la suprafața discului [164]. În toate cele trei cazuri analizate, la suprafața discurilor au fost identificate microfisuri datorită exploatării termice [51,164].

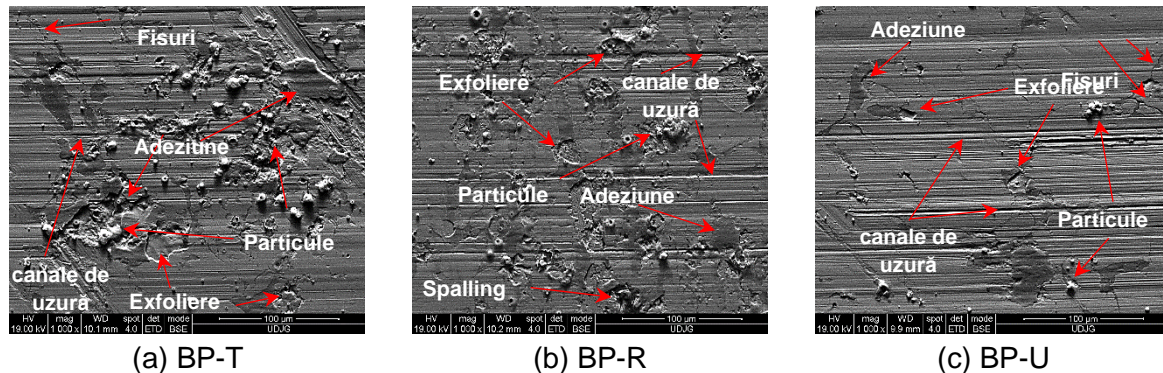


Figura 3.36. Imagini SEM ale urmelor de uzură pe suprafața discurilor (tribometrul CETR-UMT-2): (a) BP-T, (b) BP-R și (c) BP-U

3.3.4. Concluzii privind încercările tribologice

- În cazul testelor tribologice unde a fost utilizată configurația pin-pe- disc real, COF în cazul materialului de fricțiune BP-T a avut nevoie de o perioadă scurtă de adaptare (running-in) până când acesta a atins regimul stabil, în timp ce în cazul materialelor de fricțiune BP-R și BP-U, perioada de stabilizare a valorii coeficientului de frecare a avut nevoie de un timp mai mare.
- În urma încercărilor tribologice efectuate pe configurația pin-pe- disc real în cazul materialului de fricțiune BP-T s-a înregistrat cea mai mică valoare a temperaturii pe suprafața de frecare a discului de frână în timp ce în cazul materialului de fricțiune BP-U a fost înregistrată cea mai mare valoare.
- Principalul mecanism de uzură întâlnit în urma analizelor SEM efectuate pe suprafețele de frecare a celor trei materiale de fricțiune indiferent de configurația folosită este uzura de abraziune.
- La suprafața materialelor de fricțiune au fost identificate în toate cazurile cele două tipuri tipice de platouri: primare și secundare, iar cele mai mari platouri secundare sunt prezente în cazul materialului de fricțiune BP-U.
- În urma încercărilor tribologice efectuate pe tribometrul CETR-UMT-2 au fost identificate comportamente diferite ale materialelor de fricțiune comparativ cu testele efectuate pe discul de frână real.
- În cazul materialului de fricțiune BP-T (deși duritatea acestuia nu este mare comparativ cu celelalte două materiale analizate) prezența abrazivilor în componența sa a condus la o uzură mai mare a discului utilizat. Particulele desprinse de la nivelul discului au format aglomerări la baza platourilor primare ceea ce a dus la o perturbare a stratului de fricțiune format. Acest lucru a dus la o creștere a perioadei de running-in dar și la o valoare mai mare a COF.
- Prezența abrazivilor în contactul dintre cele două materiale a fost confirmată și de analizele microscopice efectuate la nivelul discului.
- Comportamentul tribologic al materialului de fricțiune BP-R este similar în ambele tipuri de configurații studiate. Au fost obținute valori similare atât în ceea ce privește valoarea COF cât și a pierderii de masă, astfel se poate concluziona că prezintă cel mai bun raport între pierderea de masă și valoarea COF(0,36).

- Temperatura înregistrată în testele efectuate pe tribometrul CETR-UMT-2 este mai mare comparativ cu testele efectuate pe disc real, acest lucru a dus la diferențe în ceea ce privește comportamentul tribologic al materialelor studiate.
- Cea mai mare valoare a COF în cadrul testelor efectuate a fost obținută de către materialul de fricțiune BP-U, acesta totodată înregistrând și cea mai mare pierdere de masă.

În urma analizei pierderii de masă atât a probelor din material de fricțiune ce au fost analizate în cadrul testelor tribologice pe tribometrul CETR-UMT-2 dar și a discurilor cu care acestea au fost testate, coroborat cu valorile medii ale COF dar și cu valorile medii ale durității acestora se poate spune că este necesar de realizat un compromis în ceea ce privește cumulumul de proprietăți COF-duritate-pierdere de masă. Analizând valorile medii ale celor trei parametri se poate observa că o duritate mare nu înseamnă neapărat o pierdere de masă mică. Totodată o valoare mică a COF nu înseamnă o pierdere de masă mică și mai important de atât, o pierdere de masă mică și o valoare mare a COF obținute pentru un material de fricțiune nu este neapărat un câștig. Materialul de fricțiune este deseori testat împotriva unor discuri din fontă cenușie, iar pierderea de masă a contra materialului este la fel de importantă ca și pierderea de masă a materialului de fricțiune. Un material de fricțiune ce înregistrează valori mici ale pierderii de masă, poate dăuna mai mult discului din fontă cenușie (cazul materialului de fricțiune BP-T din cadrul testelor realizate pe tribometrul CETR-UMT-2).

3.4 Rezultate privind încercările dinamice realizate cu ajutorul autoturismului

3.4.1. Condiții de încercare privind încercările dinamice realizate cu ajutorul autoturismului

Datorită multiplilor factori ce pot influența testele dinamice s-a recurs la o analiză a comportamentului sistemului de frânare din două perspective. În acest scop studiul a beneficiat de două abordări.

Abordarea 1

Prima abordare a constat în analizarea comportamentului termic al sistemului de frânare în cazul unei utilizări normale a autoturismului, cu deplasări în mediul urban, dar și extra urban, fără a ține cont de o anumită procedură sau frânări stabilite anterior. Astfel, temperatura suprafeței de contact a discului de frână cu plăcuța de frână a fost monitorizată pe durata a 7 zile, însumând o distanță de deplasare cumulată de aproximativ 200 km, această perioadă fiind considerată a fi suficientă pentru a putea avea un rezultat reprezentativ. Deplasările în regim urban au fost realizate în orașul Galați, pe perioada verii, cu temperaturi exterioare în jurul a 30 °C, pe sectoare de drum cu relief variat, atât în condiții de trafic intens, cât și în condiții de trafic lejer, în timp ce deplasările în regim extraurban au fost realizate în aceleași condiții, în jurul orașului.

Trebuie menționat că autoturismul utilizat în cazul primei abordări a fost echipat cu un sistem de frânare a cărui componente erau ajunse la limita de exploatare (componente uzate).

Abordarea 2

A doua abordare a constat în analizarea comportamentului termic al sistemului de frânare pe baza unei metodologii de testare stabilite. Fiecare test a constat în efectuarea a 10

frânări complete, până la oprirea autovehiculului, de la o viteză de deplasare stabilită anterior (50, 90 și 120 km/h). Vitezele de deplasare au fost alese în concordanță cu limitele de viteză impuse de regulamentul rutier pentru cele trei sectoare de drum principale: urban, extra-urban, și autostradă.

Au fost analizate componentele active (tribosistemul disc de frână – plăcuță de frână) ale unui sistem de frânare, în două condiții diferite: primul caz este reprezentat de un sistem de frânare ce prezintă componente uzate (ajunse la sfârșitul perioadei de exploatare), iar cel de al doilea caz este reprezentat de un sistem de frânare ce este echipat cu componente noi.

În cazul plăcuțelor de frână uzate, stratul materialului de fricțiune atașat pe placa suport a plăcuței de frână a măsurat aproximativ 4 mm în timp ce în cazul plăcuței de frână noi grosimea acestuia a fost de aproximativ 12 mm.

Determinările au fost realizate prin aducerea autovehiculului la viteza de deplasare maximă, stabilită prin metodologie, cu ajutorul pilotului automat, și acționarea frânei de parcare până la intensitatea propusă. Datele au fost înregistrate din momentul acționării frânei până în momentul opririi totale a autoturismului. Procedul a fost repetat de 3 ori pentru fiecare determinare în parte.

Pe baza analizei rezultatelor testelor tribologice efectuate anterior, plăcuțele de frână BP-R au obținut un rezultat favorabil și au fost utilizate în cadrul acestor determinări.

Au fost monitorizați următorii parametri: temperatura suprafeței de contact a discului de frână, distanța de frânare și timpul de frânare. Trebuie menționat că testele au fost efectuate pe un sector de drum privat, drept, fără înclinări, la o temperatură exterioară de aproximativ 25 °C.

3.4.2. Rezultate privind analizarea comportamentului termic al sistemului de frânare

Abordarea 1

Evoluția temperaturii funcție de numărul de frânări pentru testele realizate în mediu: urban; extraurban; extraurban cu frânări bruște sunt prezentate în Figura 3.38.

Figura 3.38 a prezintă media determinărilor ce cuprinde un număr de 30 de frânării efectuate în mediul urban, în condiții de condus normale. Astfel în cazul frânării autovehiculului cu intensitate mică (apăsare lentă pe pedala de frână) temperatura sistemului de frânare crește considerabil comparativ cu situația în care sistemul de frânare este acționat cu intensitate mare (frânare bruscă) (de ex frânările 13, 24, 27).

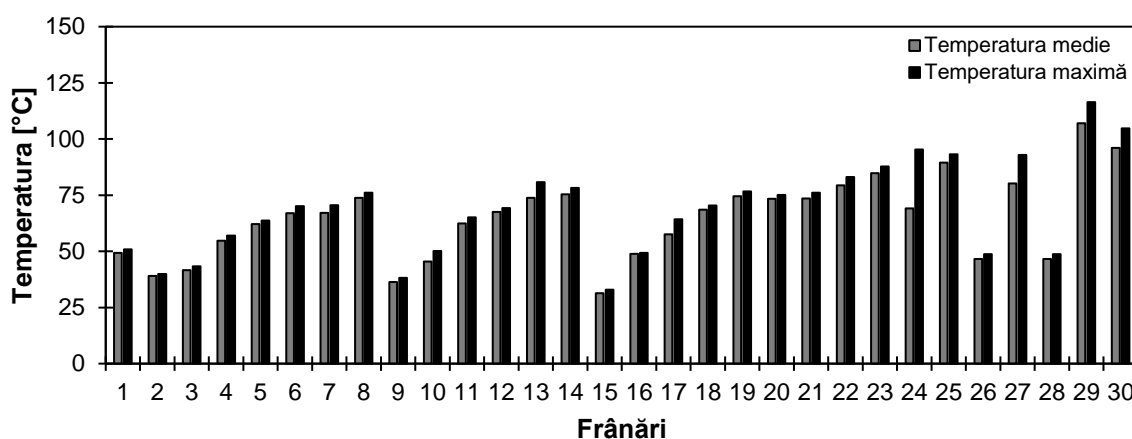
În Figura 3.38 b este prezentată evoluția temperaturii pentru cinci frânări realizate în mediu extraurban. Valorile temperaturilor înregistrate în cazul testelor efectuate în mediul extraurban în comparație cu valorile obținute în mediu urban, deși au fost realizate mai puține frânări, se datorează condițiilor de trafic (viteze de deplasare mai mari).

Figura 3.38 c prezintă variația temperaturii pentru cinci frânări bruște în mediu extraurban. Se observă valori mai mari ale temperaturilor în cazul frânărilor bruște (Figura 3.38 c) față de frânările normale (Figura 3.38 b) în condițiile mediului extraurban. În această situație, se pot observa diferențe considerabile ale temperaturilor înregistrate la finalul frânărilor, demonstrând că aceste temperaturi pot atinge în unele situații chiar și valori de peste 200 °C.

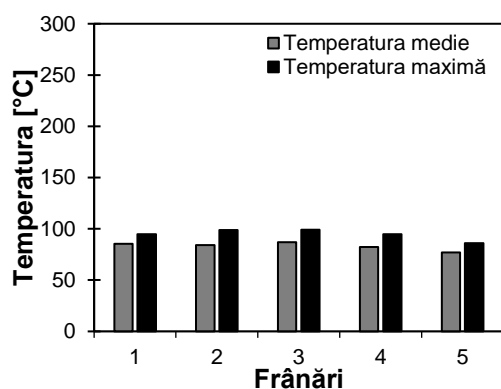
Abordarea 2

Rezultatele testelor efectuate în cadrul abordării 2 pentru cele trei viteze de testare selectate sunt prezentate în Tabelele 3.12 (sistem de frânare cu componente uzate) și 3.13 (sistem de frânare cu componente noi), iar evoluția temperaturilor în funcție de timp este dată

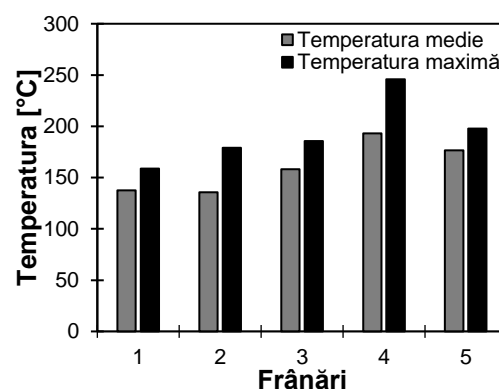
de Figura 3.41. Datorită unor aspecte ce au ținut de siguranța persoanelor implicate în experiment, determinările realizate la viteza de 120 km/h au fost reduse la un număr mai mic.



a)



b)



c)

Figura 3.38. Evoluția temperaturii funcție de numărul de frânări pentru testele realizate în mediu (abordarea 1): a) urban; b) extraurban; c) extraurban cu frânări bruște

Tabelul 3.12. Rezultatele obținute în cazul determinărilor efectuate cu componentele sistemului de frânare uzate

Nr. frânări	50km/h			90km/h			120km/h		
	Distanță de frânare $\Delta[m]$	Timp de frânare $\Delta t [s]$	Temp. $\Delta T [^{\circ}C]^*$	Distanță de frânare $\Delta[m]$	Timp de frânare $\Delta t [s]$	Temp. $\Delta T [^{\circ}C]$	Distanță de frânare $\Delta[m]$	Timp de frânare $\Delta t [s]$	Temp. $\Delta T [^{\circ}C]$
1	100,28	14,572	26,24	226,09	21,229	77,4	589,36	43,051	179,12
2	90,81	13,728	33,56	268,67	23,496	119,18	611,11	34,488	175,66
3	90,81	12,894	41,62	314,07	25,776	133,42	638,55	46,261	105,72
4	84,19	13,515	39,34	295,15	35,11	114,96	733,15	55,819	34,34
5	87,03	14,109	47,72	386,92	35,15	103,06			
6	87,03	14,381	47,14	373,67	36,13	77,08			
7	89,87	13,083	49,04	371,78	31,53	123,58			
8	88,93	14,069	55,80	284,75	29,33	142,08			
9	88,93	14,691	59,14	313,13	28,87	92,62			
10	95,54	16,399	52,84	352,86	32,13	71,88			

* ΔT reprezintă variația temperaturii dintre valoarea acesteia de la începutul unei frânări și valoarea ei de la sfârșitul frânării

În cazul celor zece frânări realizate de la o viteză de 50 km/h se poate observa că sistemul de frânare uzat prezintă un timp de frânare mai scurt decât sistemul de frânare nou, acest lucru fiind în corelație și cu distanța de frânare. Totodată în cazul sistemului de frânare ce conține componente uzate se observă o creștere mai rapidă a temperaturilor în timpul determinărilor. Acest lucru se poate datora ariei de contact reale dintre plăcuțele de frână și discul de frână ce este mult mai mare în cazul sistemului de frânare ce conține componente uzate decât în cazul sistemului de frânare ce conține componente noi. Nu au fost obținute diferențe semnificative în cazul frânărilor realizate de la viteza de 50 km/h în ceea ce privește temperatura maximă pe care componentele sistemului de frânare au atins-o la sfârșitul testelor aceasta fiind cuprinsă în intervalul 225 °C – 235 °C (Figura 3.41).

Tabelul 3.13. Rezultatele obținute în cazul determinărilor efectuate cu componentele sistemului de frânare noi

Nr. frânări	50km/h			90km/h			120km/h		
	Distanță de frânare	Timp de frânare	Temp. ΔT [°C]	Distanță de frânare	Timp de frânare	Temp. ΔT [°C]	Distanță de frânare	Timp de frânare	Temp. ΔT [°C]
	$\Delta[m]$	$\Delta t [s]$		$\Delta[m]$	$\Delta t [s]$		$\Delta[m]$	$\Delta t [s]$	
1	108,79	18,893	32,68	373,67	31,393	93,66	364,21	25,36	153,5
2	118,25	19,95	33,38	387,86	37,73	83,94	402,99	30,50	190,34
3	96,49	15,25	35,78	461,65	45,18	75,16	441,78	42,56	118,78
4	112,58	16,42	36,94	595,04	59,04	72,16	535,44	43,52	29,34
5	105,95	15,88	36,58	538,28	49,47	65,96			
6	116,36	19,04	37,42	572,33	52,96	52,70			
7	101,22	16,35	38,80	388,52	38,06	76,92			
8	107,84	17,39	39,82	598,82	60,83	47,56			
9	113,52	18,68	41,42	589,36	58,62	48,34			
10	122,98	18,22	40,30	640,98	63,09	39,88			

Din Tabelul 3.12 și 3.13, se poate observa că în cazul testelor realizate cu componentele sistemului de frânare uzate variația temperaturii este mai mare decât în cazul testelor realizate cu componentele sistemului de frânare noi.

În cazul componentelor noi, grosimea mai mare a materialului de fricțiune oferă plăcuței de frână o capacitate mai mare de a absorbi căldură (încălzirea acestuia fiind mai lentă). Acest lucru nu este neapărat un avantaj, deoarece în momentul în care (datorită unor frânări repetate) materialul de fricțiune nou acumulează căldură în cantități mari, dar eliberarea acesteia către mediul exterior se va face lent, ceea ce va duce la o încălzire mai accentuată a componentelor sistemului de frânare, acestea neavând timp suficient pentru răcire.

Un alt aspect important ce poate fi observat este reprezentat de faptul că odată cu creșterea vitezei de deplasare de la 50 km/h la 90 km/h comportamentul ambelor sisteme de frânare este aproximativ același. În cazul sistemului de frânare ce conține componente noi, atât timpul cât și distanța de frânare sunt mai mari decât în cazul sistemului de frânare echipat cu componente uzate (în unele situații timpul de frânare este aproape dublu – vezi frânarea 8). În ceea ce privește comportamentul termic al celor două sisteme de frânare în cadrul frânărilor realizate de la viteza de 90 km/h, sistemul de frânare echipat cu componente uzate a arătat un regim termic ridicat, temperaturile ajungând în cadrul ultimei frânări până la aproximativ 320°C – 330°C, în timp ce sistemul de frânare echipat cu componente noi a înregistrat o valoare maximă a temperaturii în jurul a 260°C - 270°C.

Dacă în cazul sistemului de frânare echipat cu componente uzate, temperatura înregistrată prezintă o tendință crescătoare atât la viteza de 50 km/h cât și la viteza de 90 km/h, în cazul sistemului de frânare echipat cu componente noi, comportamentul termic este diferit. Dacă în cazul primelor determinări în cazul sistemului de frânare echipat cu componente noi (realizate de la viteza de 50 km/h) aproximativ jumătate dintre frânări se încadrează în intervalul de temperatură 100°C - 150°C, în cazul determinărilor realizate de la viteza de 90 km/h aproximativ 80% dintre frânări se încadrează în intervalul 200°C - 250°C.

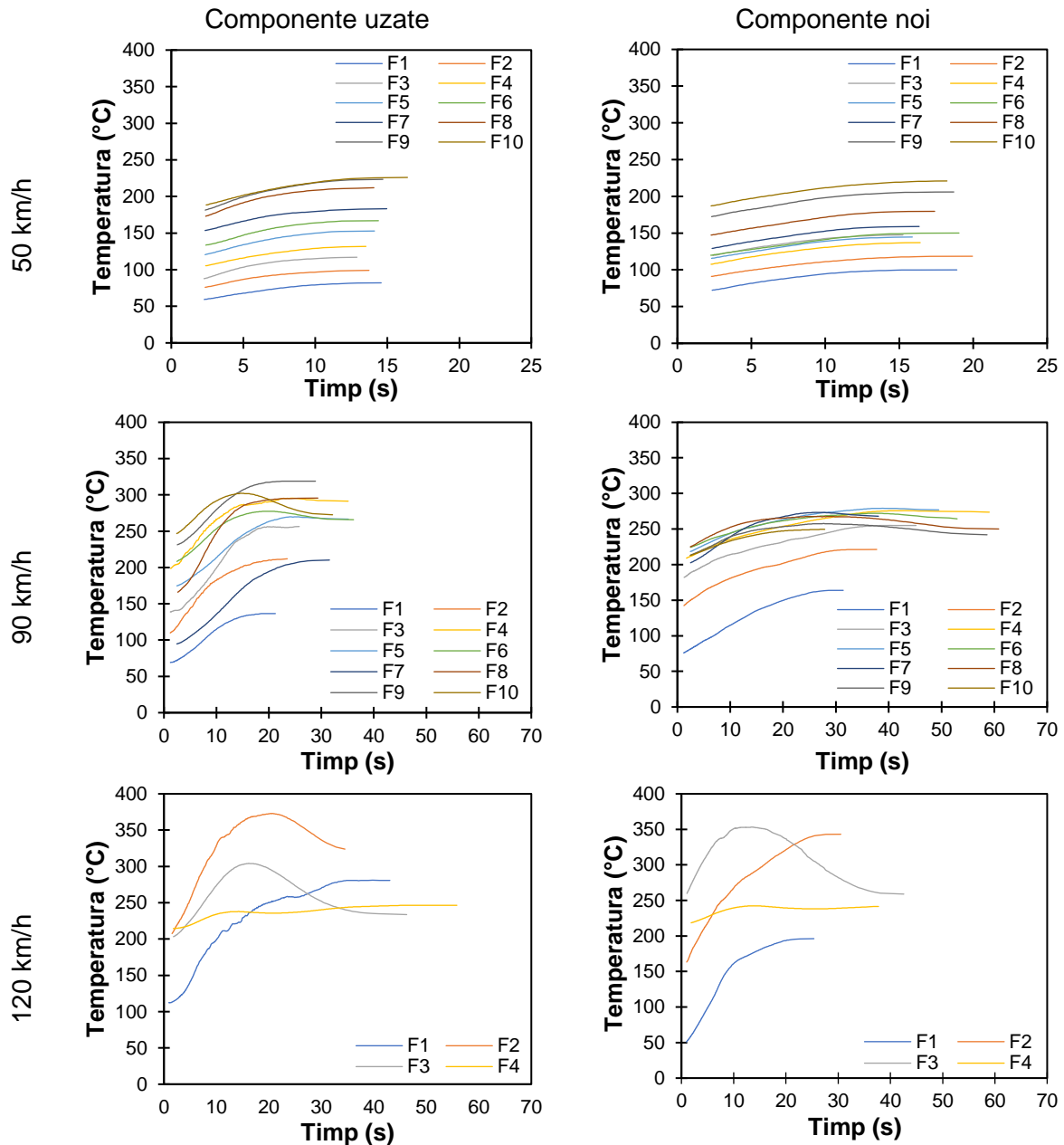


Figura 3.41. Evoluția temperaturii cu timpul (abordarea 2)

Atunci când viteza de deplasare a autovehiculului a fost crescută până la viteza maximă luată în studiu 120 km/h (cazul deplasărilor pe un sector de drum de mare viteză) au fost observate schimbări esențiale în comportamentul sistemului de frânare. În această situație, sistemul de frânare echipat cu componente noi a prezentat un timp de frânare mai scurt și o distanță de frânare mai mică comparativ cu sistemul de frânare echipat cu componente uzate. Sistemului de frânare echipat cu componente uzate, în unele situații, a

prezentat timpi de frânare mai mari cu aproximativ 10 secunde și distanțe de frânare mai lungi cu aproximativ 200 m, comparativ cu sistemul de frânare echipat cu componente noi, chiar dacă comportamentul termic al acestora este aproximativ similar. Temperatura maximă înregistrată în cazul frânelor de la 120 km/h a fost de aproximativ 350°C în cazul ambelor tipuri de sisteme utilizate.

3.4.3. Concluzii privind încercările dinamice realizate cu ajutorul autoturismului

Multitudinea constituenților chimici ce compun materialul de fricțiune utilizat la producerea plăcuțelor de frână dar și complexitatea factorilor externi ce influențează comportamentul sistemului de frânare în mod continuu fac ca înțelegerea fenomenelor ce apar în timpul frânelor să fie foarte dificilă. Totuși, aceste aspecte sunt foarte importante în dezvoltarea de materiale de fricțiune noi. În urma testelor dinamice realizate cu ajutorul autoturismului în vederea înțelegerii comportamentului termic al sistemului de frânare dar și a influenței acestuia asupra performanțelor lui, se pot trage următoarele concluzii:

- Temperatura medie de exploatare a sistemului de frânare în condiții de condus normale, cu respectarea conduitei preventive și în regim de trafic urban este în jurul valorii de $80^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$, în condiții de condus normale dar în regim extra-urban, temperatura medie înregistrată la nivelul sistemului de frânare este de $70^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$, iar în condiții de condus agresiv, cu frânări bruște, media temperaturilor înregistrate este de $110^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$. Un aspect foarte important de menționat este faptul că, în cazuri particulare, aceste valori ale temperaturilor pot fi chiar și de 3 ori mai mari, pentru o perioadă scurtă de timp.
- În cazul frânelor lente s-a înregistrat o creștere mai mare a valorii temperaturii componentelor sistemului de frânare decât în cazul frânării bruște de la aceeași viteză de deplasare.
- Exploatarea unui sistem de frânare convențional (fără performanțe ridicate) într-un interval de temperaturi ridicate duce la deteriorarea prematură a componentelor sistemului de frânare.
- În cazul încercărilor realizate pe un sistem de frânare ce conține componente uzate (plăcuțe-disc de frână) rezultatele testelor au arătat un timp și o distanță de frânare mai mici în condiții de trafic urban și în unele situații în condiții de trafic extra urban, față de rezultatele obținute în cazul încercărilor unui sistem de frânare cu plăcuțe și discuri de frână noi.
- În cazul încercărilor realizate pe un sistem de frânare echipat cu plăcuțe și discuri de frână noi performanțe optime au fost obținute în cazul frânelor efectuate de la o viteză de deplasare de 120 km/h. Conform rezultatelor obținute în cazul utilizării unui sistem de frânare ce conține componente uzate distanța de frânare poate fi cu până la 200 m mai lungă iar timpul de frânare cu până la 10 secunde mai mare decât în cazul unui sistem de frânare cu componente noi.

Capitolul 4 Rezultate experimentale privind comportamentul noilor materiale compozite de fricțiune dezvoltate în urma procesului de reciclare

4.1. Analize micrografice de structură, duritate și de porozitate

4.1.1. Analize microstructurale

În Figura 4.1 este prezentată microstructura materialului de referință (RR), iar în Figura 4.2 sunt prezentate imaginile SEM ale noilor materiale de fricțiune dezvoltate în cadrul tezei de doctorat (RR_10%TiO₂, RR_20%TiO₂, RR_10%ZrSiO₄, RR_20%ZrSiO₄).

S-a realizat o analiză EDAX în cazul tuturor rețetelor de materiale propuse. Analiza EDAX este prezentată în Tabelul 4.1. Analiza chimică a fost efectuată la nivel global (pe întreaga suprafață a materialului de fricțiune) pe imaginile SEM la o mărire de 90x (Figura 4.1a și Figura 4.2a), suprafața acoperită fiind considerată reprezentativă pentru a îngloba totalitatea elementelor chimice componente.

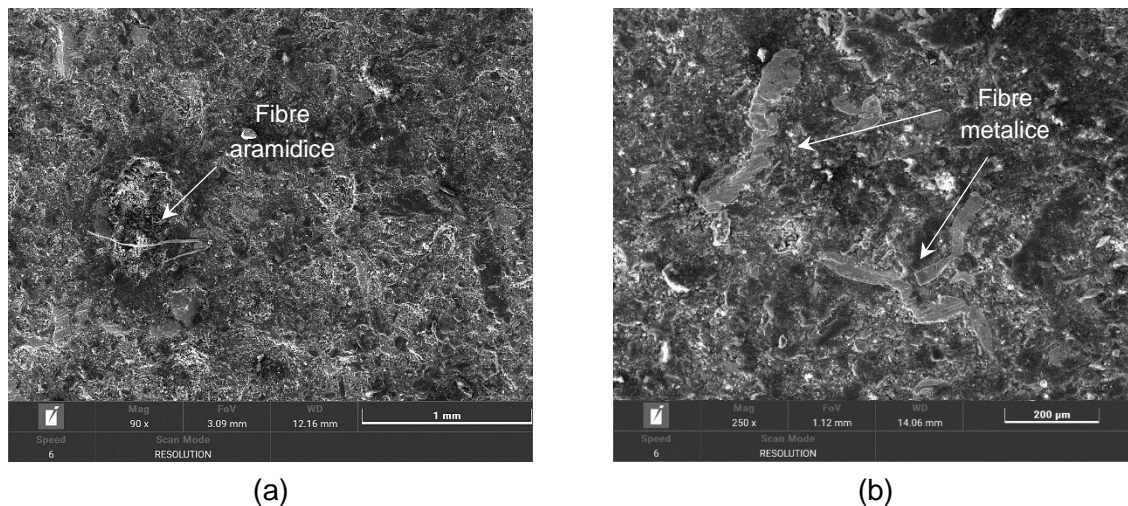
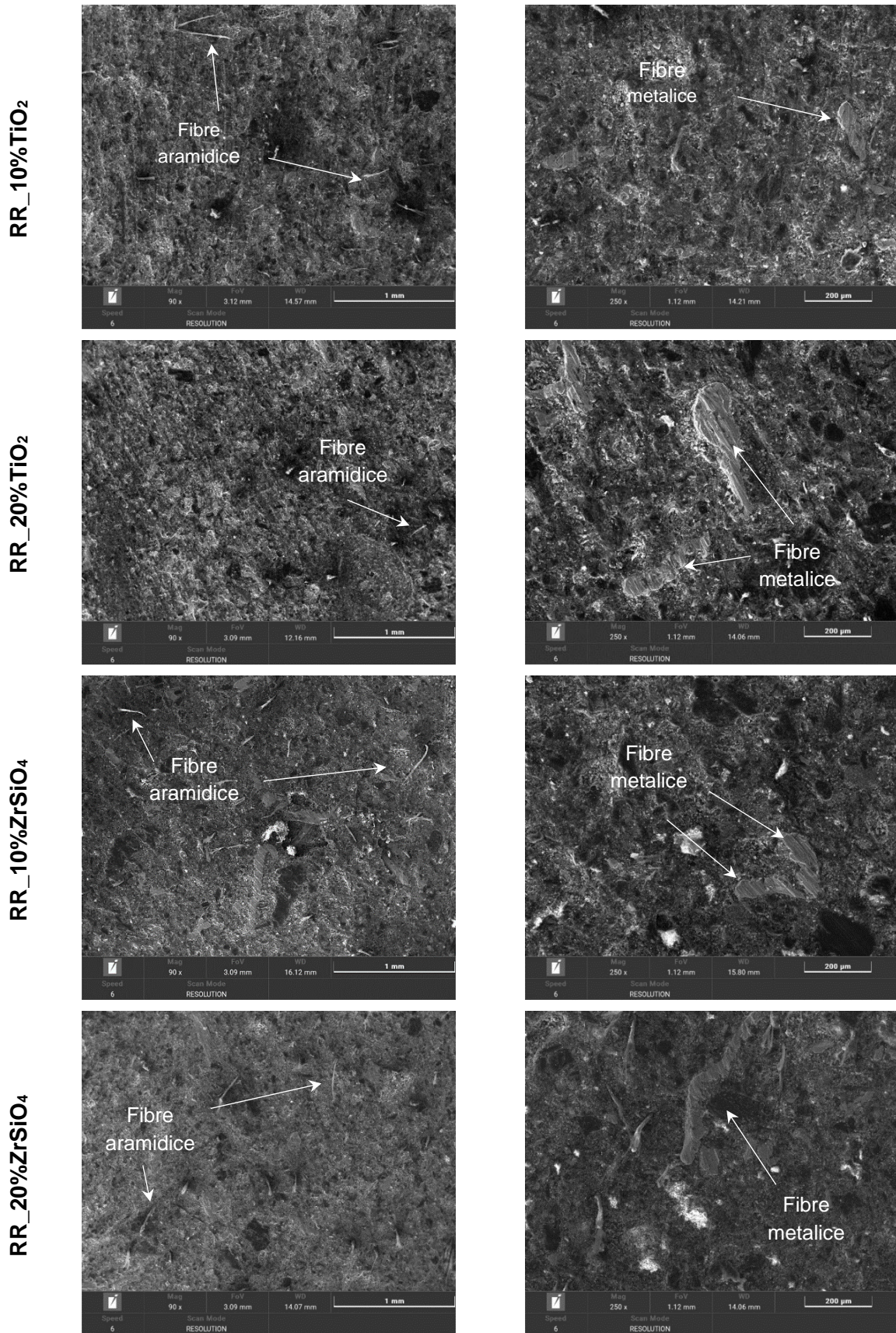


Figura 4.1. Imagini SEM ale microstructurii materialului de referință dezvoltat cu două mărituri: (a) 90X și (b) 250X

Din Figura 4.1 se poate observa că materialului de fricțiune RR prezintă o structură omogenă, cu o bună distribuție a constituenților chimici. După cum se observă în Figura 4.2 buna distribuție a componentelor s-a păstrat și în cazul în care au fost adăugate în amestecul considerat ca bază (RR) alte componente chimice (TiO₂ și ZrSiO₄).

Atât în Figura 4.1, cât și în Figura 4.2 se poate identifica cu ușurință fibrele aramidice adăugate în toate rețetele propuse. Se observă și prezența fibrelor metalice (Figura 4.1 b și Figura 4.2 b). Datorită procesului de frezare utilizat în etapa de reciclare a materialului de fricțiune BP-R, matricea prezintă fibre metalice de o dimensiune mai mică față de fibrele

utilizate în materialul de fricțiune comercial, acestea fiind puse în evidență în cadrul imaginilor obținute în urma analizei SEM la o mărire de 250x.



(a) apropiere 90X

(b) apropiere 250X

Figura 4.2. Imagini SEM ale microstructurii materialelor dezvoltate, derivate din rețeta de bază

Tabelul 4.1. Analiza chimică a probelor din materialele de fricțiune dezvoltate în acest studiu

	RR	RR_10%TiO ₂	RR_20%TiO ₂	RR_10%ZrSiO ₄	RR_20%ZrSiO ₄
C	64,2	58,83	52,44	63,02	60,92
O	17,94	20,82	22,86	18,47	18,91
Mg	0,5	0,47	0,44	0,45	0,37
Al	1,57	1,62	1,63	1,37	1,2
Si	1,12	1,04	0,96	1,96	2,7
P	0,02	0,01	0,04	0	0
S	1,79	1,6	1,39	1,43	1,21
Ca	3,75	3,04	2,77	2,86	2,34
Ti	0,75	6,29	11,44	0,55	0,49
Mn	0,99	0,73	0,71	0,75	0,66
Fe	6,4	4,84	4,62	5,34	4,7
Zn	0,97	0,72	0,71	0,67	0,54
Zr	0	0	0	3,14	5,97

Deoarece amestecul de bază (matricea) este formată din pulbere obținută în urma procesului de reciclare al materialului de fricțiune BP-R, se poate observa că materialul de referință RR are o compoziție chimică asemănătoare cu a acestuia (Tabelul 3.1).

În cazul materialelor în care a fost adăugat TiO₂ se observă valori crescătoare de la 6,29% în cazul materialului compozit de fricțiune RR_10%TiO₂, la 11,44% în cazul materialului RR_20%TiO₂. În cazul materialului de fricțiune în care s-a adăugat ZrSiO₄ pe suprafața materialelor au fost identificate faze mai bogate în Zr (care nu face parte din compoziția chimică de bază a materialului de fricțiune BP-R) și Si (într-o cantitate mai mare față de cantitatea identificată în materialul de referință). Un alt aspect important îl reprezintă concentrația de Fe, care conform analizei chimice este mai mică în cazul probei RR în comparație cu materialul BP-R.

4.1.2. Teste de duritate și porozitate

În Figura 4.3 sunt prezentate grafic rezultatele determinărilor de duritate efectuate pe noile materiale de fricțiune RR_10%TiO₂, RR_20%TiO₂, RR_10%ZrSiO₄, RR_20%ZrSiO₄ și pe materialul de referință RR ca media a 6 indentări.

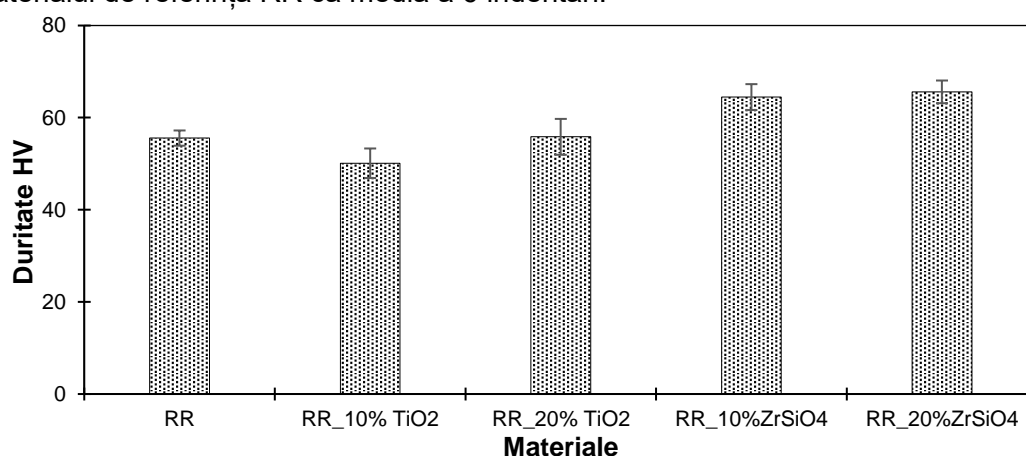
**Figura 4.3.** Valorile durității pentru noile materiale de fricțiune

Figura 4.4 prezintă porozitatea materialelor de fricțiune dezvoltate. În urma măsurătorilor se poate observa faptul că porozitatea materialului de referință are o valoare

apropiată cu cea a materialului din care a fost obținută matricea (BP-R). Pentru materialele compozite armate cu 10 și 20% TiO_2 se obțin valori apropiate cu cele ale materialului de referință.

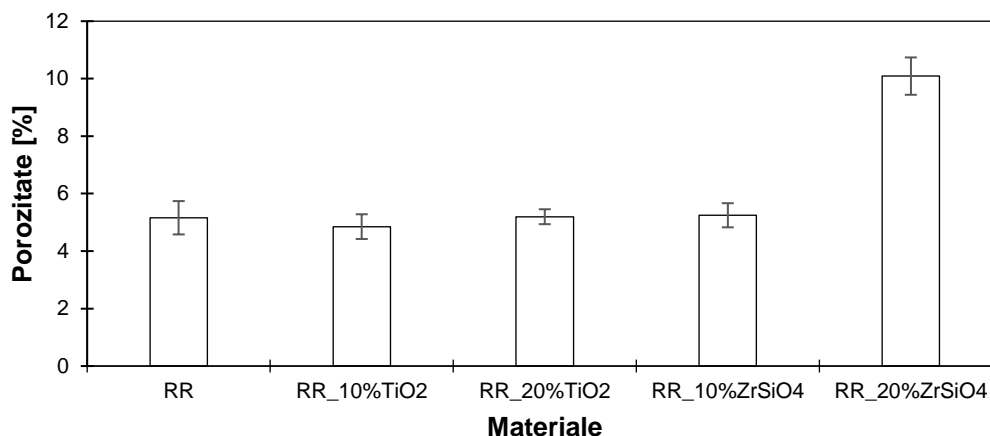


Figura 4.4. Porozitatea noilor materiale de fricțiune

În ceea ce privește materialele de fricțiune aditivate cu ZrSiO_4 , se poate observa că un procent de 10% nu modifică considerabil valorile porozității dar, când acesta este majorat la 20%, valoarea porozității se dublează.

Valorile crescute ale porozității se pot datora și utilizării fibrelor de kevlar. Literatura de specialitate raportând o corelație între utilizarea fibrelor de kevlar în cantități mari și creșterea porozității materialelor de fricțiune [91].

4.1.3. Condiții de încercare privind testele tribologice pe noile materiale compozite de fricțiune

Pentru caracterizarea noilor materiale de fricțiune acestea au fost supuse unor teste tribologice utilizând configurația pin-pe-disc real. Condițiile de testare utilizate sunt identice cu cele folosite pentru materialele de fricțiune comerciale (Figura 3.26).

4.1.4. Rezultate privind teste tribologice pe noile materiale compozite de fricțiune

Evoluția COF și a temperaturii suprafeței de frecare în raport cu timpul în cadrul testelor tribologice efectuate asupra materialelor de fricțiune dezvoltate este dată în Figura 4.5, în timp ce în Figura 4.6 sunt prezentate valorile medii ale COF pentru toate materialele de fricțiune dezvoltate.

Analizând rezultatele obținute se poate observa că în general toate materialele de fricțiune dezvoltate prezintă o evoluție tipică a valorilor COF, în toate cazurile putând fi identificate cu ușurință atât etapele de running-in, cât și regimul stabil. Temperatura de la suprafața discului a avut o tendință crescătoare pe durata testului în toate cazurile analizate, valorile obținute la finalul determinărilor fiind apropiate ($45 - 50^\circ\text{C}$).

Cea mai bună valoare medie a COF (0,41) dar și cea mai mare temperatură (aproximativ 56°C) a fost obținută în cadrul testelor realizate cu materialul de fricțiune RR_20%ZrSiO₄. Acesta prezintă o stabilitate bună a COF atât în perioada de running-in cât și pe durata regimului stabil.

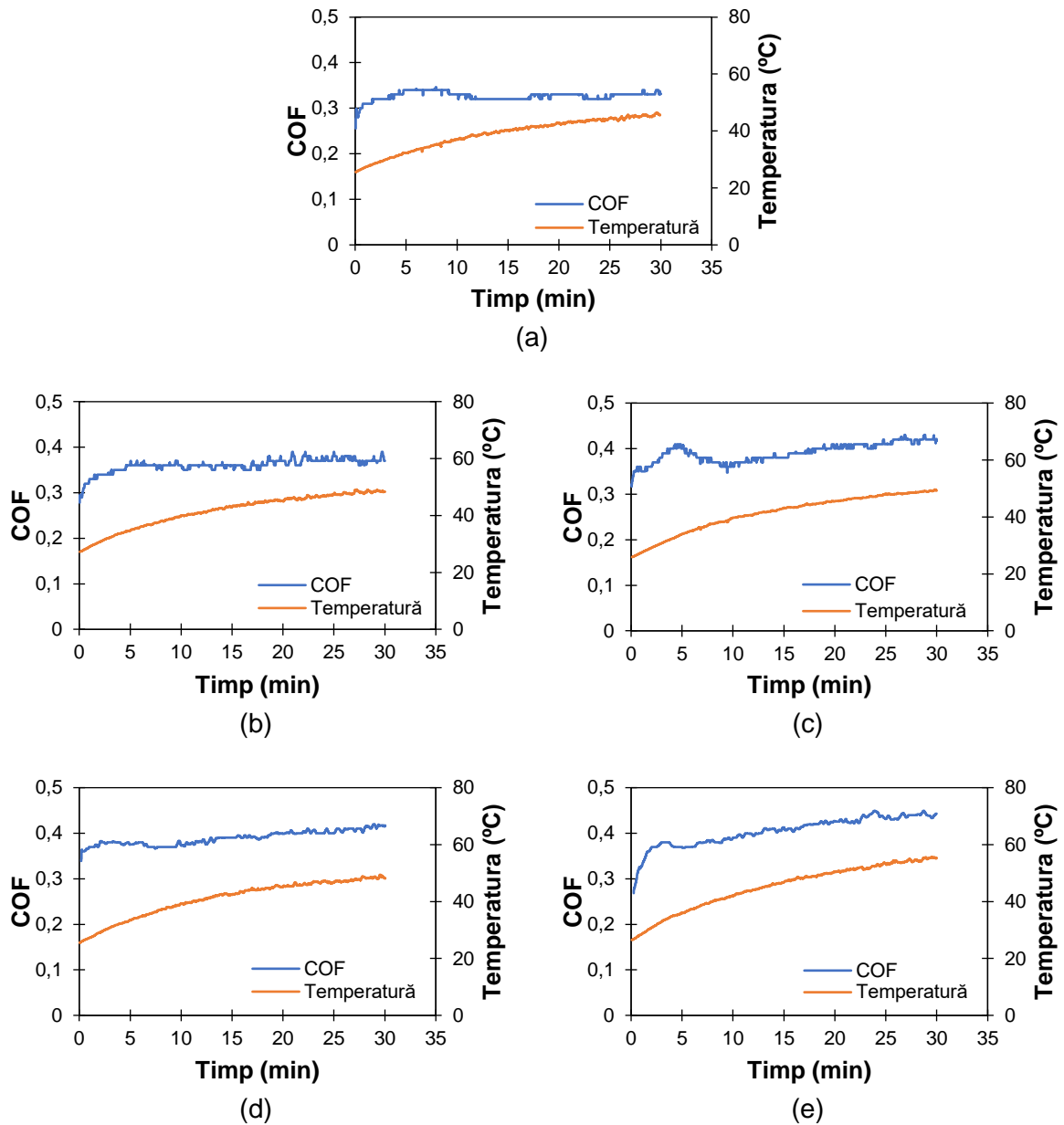


Figura 4.5. Evoluția COF și a temperaturii pe durata testelor tribologice efectuate asupra materialelor de fricțiune: (a) RR, (b) RR_10%TiO₂, (c) RR_20%TiO₂, (d) RR_10%ZrSiO₄ și (e) RR_20%ZrSiO₄

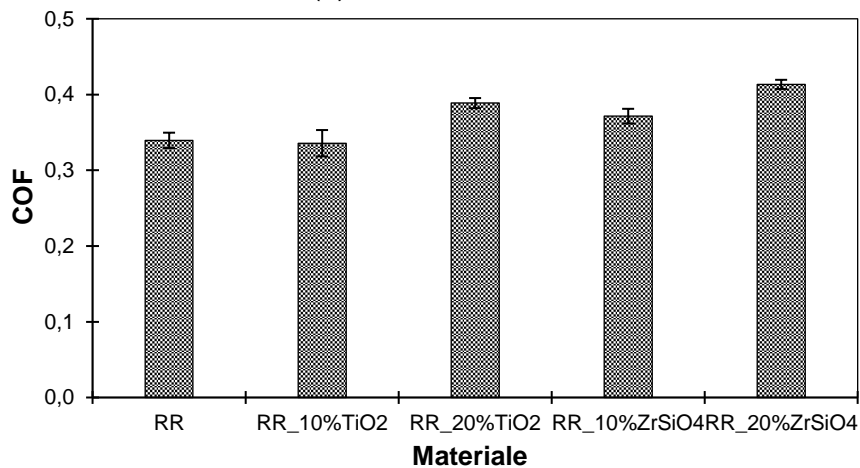


Figura 4.6. Valorile medii ale COF funcție de materialele de fricțiune dezvoltate

Figura 4.7 prezintă pierderea de masă a materialelor de fricțiune în urma testelor tribologice.

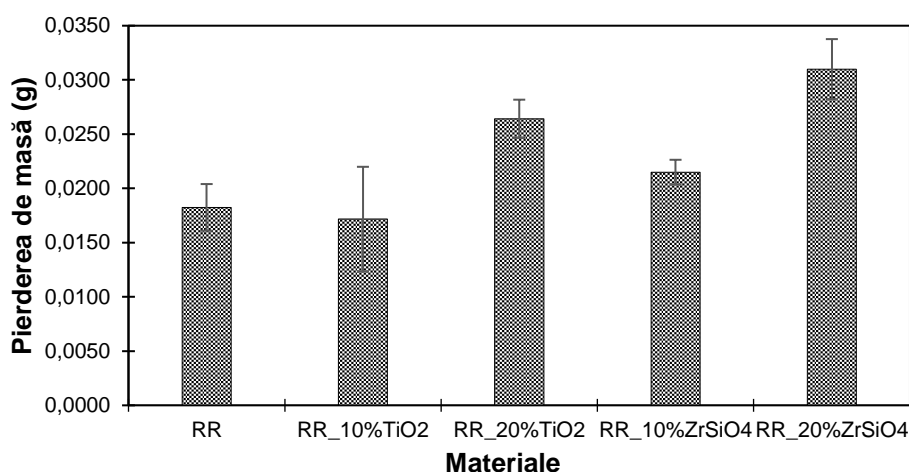


Figura 4.7. Pierderea de masă funcție de materialele de fricțiune dezvoltate

Din Figura 4.7 se poate observa că valorile pierderilor de masă ale materialelor de fricțiune dezvoltate variază de la o valoare de 0,017 g (în cazul materialului de fricțiune RR_10%TiO₂) până la o valoare de 0,031 g (în cazul materialului de fricțiune RR_20%ZrSiO₄).

Materialul de fricțiune RR a obținut o pierdere de masă de aproximativ 0,018 g. În Figura 3.30 se poate observa că materialul de fricțiune (BP-R) din care este obținută matricea materialului de referință RR, în condiții de testare similare a înregistrat o pierdere de masă de aproximativ 0,007 g. Totodată, materialul de fricțiune BP-R a arătat o duritate mai mare comparativ cu cea a materialului de fricțiune RR. Prin adăugarea a 10% TiO₂ în cadrul materialului de referință pierderea de masă a înregistrat o valoare de aproximativ 0,017 g, în timp ce duritatea acestuia a scăzut considerabil. Când cantitatea de TiO₂ adăugată la rețeta materialului de referință crește de la 10% la 20% duritatea materialului de fricțiune atinge o valoare egală cu a materialului de referință, dar pierderea de masă crește până la 0,026 g.

4.1.5. Analiza suprafețelor uzate pe baza microscopiei electronice de baleiaj (SEM) și a spectroscopiei de raze X cu dispersie de energie (EDAX)

Analiza microstructurii suprafețelor uzate ale tuturor materialelor de fricțiune dezvoltate în cadrul prezentei teze de doctorat este prezentată în Figura 4.8. Se poate observa cu ușurință faptul că în cazul tuturor probelor analizate principalul mecanism de uzură este abraziunea (sunt identificate canale de uzură). Interesant este faptul că la suprafața materialelor de fricțiune sunt prezente puține platouri primare și de dimensiuni relativ mici. Deoarece matricea din care au fost realizate materialele de fricțiune conține fibre metalice fracționate (de o dimensiune mai mică), platourile primare tind să apară în zonele în care sunt prezente fragmente metalice.

Platourile primare de o dimensiune mai mare au fost identificate în cazul materialului de fricțiune RR_20%ZrSiO₄ și RR_20%TiO₂. În urma procesului de frecare constituenții chimici mai moi (precum rășina fenolică) se desprind de la suprafața materialului de fricțiune și expun particulele mai dure la un contact direct cu discul [261]. Deoarece duritatea particulelor de ZrSiO₄ și TiO₂ este mai mare decât duritatea discului, în urma interacțiunii dintre materialele de fricțiune și disc se observă apariția unor urme de Fe la nivelul materialului de fricțiune [148]. Într-un proces de frecare îndelungat aceste particule de Fe (ce se desprind de la suprafața discului) ar putea ajuta la formarea platourilor.

Particulele abrazive mici participă și ele la formarea zonelor de contact, dar cu precădere la formarea platourilor secundare. În general aceste particule rulează în zona de contact și se amestecă cu alte tipuri de particule eliminate în timpul frânării, conducând la mărirea zonei de contact. Deoarece platourile secundare se formează la baza platourilor primare datorită aglomerărilor de particule, lipsa fibrelor de ranforsare dure ce favorizează formarea platourilor primare face imposibilă apariția platourilor secundare. Particulele rulează în contact ducând în acest fel la pierderi de masă mai ridicate.

Pe lângă aceste aspecte, particulele abrazive mici nu pot oferi materialului de fricțiune proprietăți de consolidare de aceea acestea se degradează la temperaturi înalte. În același timp acestea conferă materialului de fricțiune proprietăți de disipare a căldurii [261].

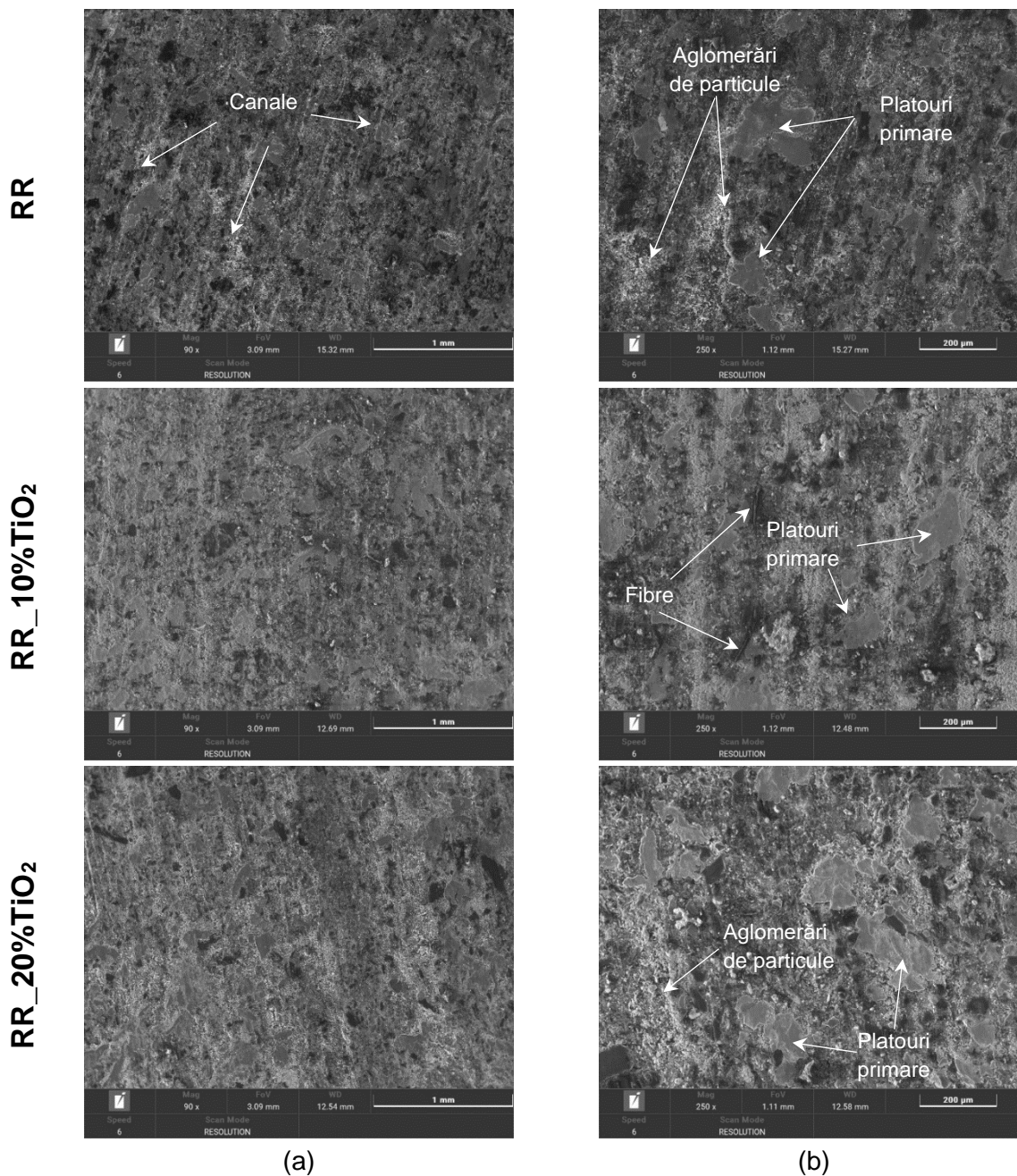


Figura 4.8 Imagini SEM ale urmelor de uzură pentru noile materiale de fricțiune: (a) mărire 90X și (b) mărire 250X

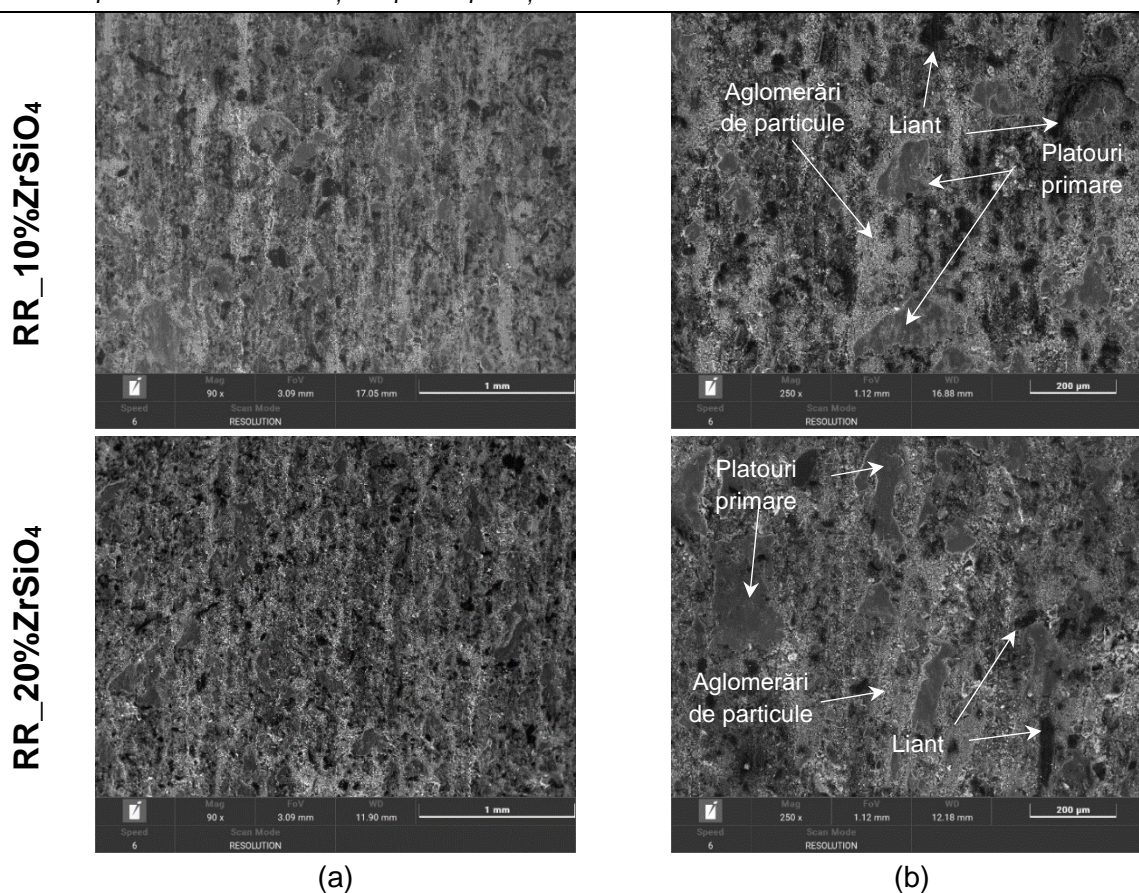


Figura 4.8 Imagini SEM ale urmelor de uzură pentru noile materiale de fricțiune: (a) mărire 90X și (b) mărire 250X (continuare)

Un alt aspect important este dat de faptul că utilizarea particulelor abrazive de dimensiuni mici face ca procesul de abraziune să fie unul mai puțin agresiv comparativ cu materialele de fricțiune ce au în componența lor particule abrazive de dimensiuni mari [261]. După cum se poate observa în Figura 4.8 acest lucru este confirmat și de analizele SEM efectuate la suprafața materialelor de fricțiune dezvoltate în cadrul tezei de doctorat, unde uzura de abraziune a fost identificată. Datorită dimensiunilor mici ale particulelor abrazive, canalele apărute în urma abraziunii sunt mult mai dese și de adâncime mică.

Silicatul de zirconiu are un rol important în formarea filmurilor de fricțiune, deoarece odată cu creșterea cantității de $ZrSiO_4$ în compoziția materialului de fricțiune filmele de fricțiune se distrug. Aceasta poate fi una din principalele cauze ale pierderii de masă excesive observate în cazul probei RR_20% $ZrSiO_4$.

4.1.6. Concluzii privind încercările tribologice ale noilor materiale compozite de fricțiune

- În urma testelor efectuate s-a observat că prin procesul de reciclare al materialelor de fricțiune comerciale se pot obține performanțe similare prin adăugarea unor aditivi de fricțiune.
- Pe baza analizei EDAX au fost identificate toate componentele chimice ale materialului de bază (pulberea obținută din materialul de fricțiune comercial BP-R) și de asemenea au putut fi identificați și noii constituenți adăugați: TiO_2 și $ZrSiO_4$.
- Rezultatele obținute în urma testelor de duritate au arătat valori mai mari față de materialul de bază în cazul a două rețete de material propuse (în cazul materialelor în care a fost adăugat $ZrSiO_4$).

- Prin adăugarea pulberilor de TiO_2 s-au obținut valori apropiate față de cele ale materialului de bază în ceea ce privește duritatea.
- Rezultatele analizelor de porozitate arată că metoda de procesare prin presare la cald și parametrii selectați sunt adecvați pentru realizarea unor materiale de fricțiune cu o porozitate redusă, deși o cantitate prea mare de $ZrSiO_4$ adăugată în materialul de fricțiune a dus la obținerea unor materiale cu o porozitate mai mare.
- Creșterea valorilor pierderii de masă ale materialelor de fricțiune dezvoltate odată cu creșterea cantității de aditivi de fricțiune sugerează că o cantitate prea mare de abraziv adăugată în componența materialelor de fricțiune nu este aplicabilă în cazul plăcuțelor de frână comerciale.
- În urma încercărilor tribologice realizate asupra materialelor de fricțiune noi se observă o îmbunătățire a valorilor COF odată cu creșterea cantității de TiO_2 sau $ZrSiO_4$ în compoziția materialului de fricțiune. Valorile COF obținute în urma testelor tribologice realizate pe materialele de fricțiune dezvoltate sunt aproximativ egale cu cele obținute în cazul testelor realizate cu ale materialului de fricțiune BP-R, iar în unele cazuri au fost obținute chiar la valori mai bune.
- În ceea ce privește pierderea de masă a materialelor dezvoltate nu s-au observat îmbunătățiri în comparație cu valorile obținute în cazul materialului de fricțiune din care a fost obținută matricea utilizată la producerea materialelor de fricțiune.
- În ceea ce privește analiza microstructurală efectuată după testele de uzură se poate observa că urmele de uzură au un aspect puțin diferit în comparație cu materialul BP-R, platourile primare care se formează în cazul noilor materiale sunt mult mai mici având probleme în suportarea sarcinii ceea ce duce la o pierdere de material mai mare.

Capitolul 5. Modelarea cu rețele neuronale a compoziției materialelor de fricțiune utilizate pentru plăcuțele de frână

5.1 Introducere

În vederea implementării modelului bazat pe ANN a fost necesară parcurgerea următoarelor etape specifice [267]:

- achiziția datelor, în seturi de valori de intrare - valori corespunzătoare de ieșire,
- structurarea rețelei, în funcție de datele prelucrate, pentru fiecare set de date fiind o structură de rețea (număr de neuroni și straturi) optimă,
- antrenarea rețelei, cu un nivel de eroare specificat, efectuată prin modificarea corespunzătoare a valorilor ponderilor sinaptice.

5.2. Modelul ANN pentru materialele de fricțiune comerciale

5.2.1. Construirea modelului ANN pentru materiale de fricțiune comerciale

Seturile de date necesare construirii și antrenării rețelei neuronale cuprind date de intrare și date de ieșire cunoscute. Datele de intrare sunt reprezentate de 17 constituenți chimici diferiți identificați în cadrul analizei EDAX (Tabelul 3.1) efectuate la nivelul materialelor de fricțiune comerciale analizate în cadrul prezentei teze de doctorat, în procente de masă, în timp ce datele de ieșire sunt reprezentate de valorile celor trei parametri obținuți în urma testelor tribologice efectuate (coeficientul de frecare, pierderea de masă și temperatura înregistrată la finalul testului). În ceea ce privește construirea modelului ANN au fost de implementate datele de intrare – ieșire în programul EasyNN. Astfel s-a obținut o structură a rețelei neuronale cu 4 straturi, structurată astfel:

- un strat de intrare cu 17 neuroni,
- două straturi ascunse cu 41, respectiv 42 neuroni și
- un strat de ieșire cu trei neuroni

5.2.2. Analiza influenței constituenților asupra valorilor de ieșire

Din Figura 5.5 se poate observa că influența maximă asupra datelor de ieșire (valorile COF, pierderea de masă și temperatura) o are Cu, urmat la o diferență mică de P, Fe Si, Al și Zn. Această constatare este în perfectă concordanță cu faptul că metalele moi (Cu și Al) asigură o valoare ridicată a COF, în timp ce Fe, Zn și Si asigură materialului de fricțiune o rezistență mecanică corespunzătoare. Ca urmare, dacă se dorește modificarea valorilor parametrilor de ieșire, trebuie modificate cu precădere procentajele acestor constituenți chimici.

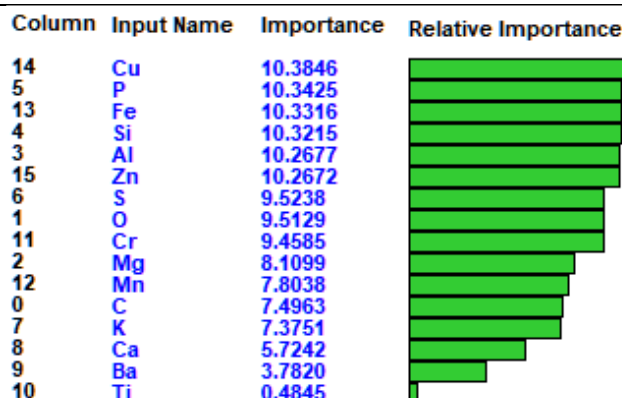


Figura 5.5 Analiza importanței constituenților chimici asupra valorilor de ieșire pentru materialele de ficțiune comerciale

5.3. Model ANN pentru noile materiale de fricțiune dezvoltate în cadrul prezentei teze de doctorat

5.3.1. Construirea modelului ANN pentru compoziții noi

În vederea stabilirii arhitecturii optime pentru modelul ANN este necesară structurarea datelor în date de intrare și date de ieșire.

Valorile corespunzătoare compoziției de bază, calculate ca medii ale celor două rezoluții (90x și 250x) au fost introduse în model ca valori numerice reale, în timp ce valorile corespunzătoare adaosurilor de TiO_2 și ZrSiO_4 au fost introduse ca valori logice. În urma implementării setului de date în EasyNN, a fost obținută structura rețelei neuronale (Figura 5.8), formată din trei straturi ascunse cu 19, 22 și, respectiv 14 neuroni.

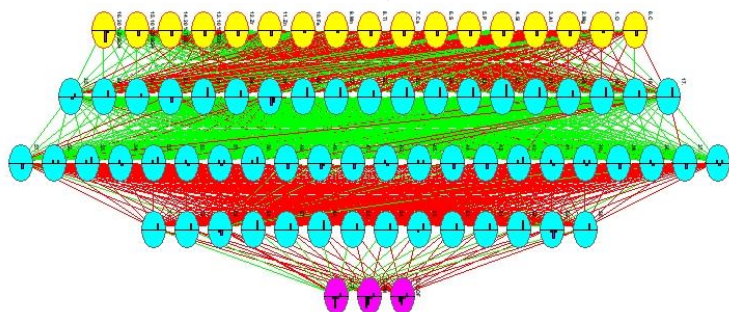


Figura 5.8. Structura modelului ANN pentru materialele de fricțiune dezvoltate

5.3.2. Analiza influenței compoziției asupra valorilor de ieșire

Primă etapă a constat în utilizarea modelului ANN pentru stabilirea celor mai importante elemente chimice ce au influență directă asupra parametrilor de ieșire. Se poate observa, în Figura 5.10, că pe prima poziție se află TiO_2 , un material ceramic cu o duritate ridicată dar în cantitate mai mică (10% - procente de masă). Se poate observa că odată cu dublarea cantității de TiO_2 în procente de masă, importanța acestui element chimic se reduce considerabil, acest lucru fiind în concordanță cu rezultatele obținute în urma testelor tribologice, unde se poate observa că odată cu creșterea cantității de TiO_2 în procente de masă în cadrul materialului de fricțiune s-au observat îmbunătățiri în ceea ce privește valoarea medie a COF (valoarea a crescut de la 0,34 la 0,39), dar a fost afectată stabilitatea acestuia, totodată obținându-se valori

mari și pentru pierderea de masă. Pe următoarea poziție întâlnim Al, un element chimic cu o duritate scăzută, dar cu o predispunere ridicată la oxidare în contact cu aerul. Prin urmare, în prezența O, la suprafața Al apare o pulbere cu o duritate ridicată (Al_2O_3). Conform literaturii de specialitate, ambele elemente chimice au o influență considerabilă asupra COF.

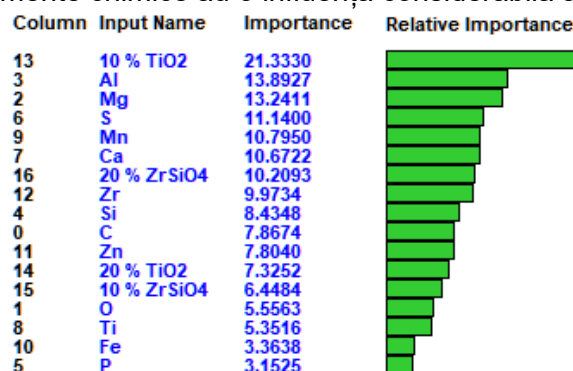


Figura 5.10. Analiza importanței constituenților chimici asupra valorilor de ieșire pentru materialele de ficțiune dezvoltate

În vederea optimizării compoziției chimice a materialelor de fricțiune dezvoltate pentru obținerea unor parametri tribologici superiori a fost utilizat modelul ANN. Rezultatele obținute în urma procesului de optimizare sunt afișate în Tabelul 5.1.

După cum se poate observa în Tabelul 5.1 procedura de optimizare efectuată de către modelul ANN propune trei rețete noi de materiale de fricțiune, câte una pentru fiecare parametru tribologic setat. Astfel pentru obținerea unor valori cât mai mari ale COF se poate utiliza compoziția chimică ANN 1, pentru obținerea unei pierderi de masă cât mai mici se poate utiliza compoziția chimică ANN 2, iar pentru o temperatură cât mai scăzută a suprafeței de frecare se poate utiliza compoziția chimică ANN 3.

Tabelul 5.1. Valori optimizate ale componentelor chimice prezente în materialele de fricțiune dezvoltate pentru obținerea unor parametri tribologici superiori

	ANN 1	ANN 2	ANN 3
C	53,60	64,000	64,000
O	17,840	22,200	22,200
Mg	0,400	0,500	0,500
Al	1,170	1,600	1,600
Si	2.695	0,940	1,26
P	0,030	0,004	0
S	1,210	1,820	1,570
Ca	2,390	3,650	2,390
Ti	0,520	10,900	10,900
Mn	0,680	0,980	0,710
Fe	6,690	4,460	4,460
Zn	0,570	0,880	0,570
Zr	6,020	0	1,260
10 % TiO₂	FALSE	TRUE	TRUE
20 % TiO₂	TRUE	FALSE	FALSE
10 % ZrSiO₄	FALSE	FALSE	TRUE
20 % ZrSiO₄	TRUE	FALSE	FALSE
COF	MAX (0,41)	0,33	0,33
Pierderea de masă	0,03	MIN (0,018)	0,02
Temperatura	52,64	49,29	MIN (46,047)

În urma analizei datelor obținute (Tabelul 5.1) se poate menționa faptul că $ZrSiO_4$ are o influență mare asupra valorilor COF, acest lucru fiind confirmat și de literatura de specialitate [147,148], în timp ce TiO_2 ajută la obținerea unor valori scăzute atât pentru pierderea de masă cât și pentru temperatura de testare.

Prin urmare, pe baza rezultatelor prezentate în Tabelul 5.1, se poate opta pentru o compoziție chimică care să ofere valori optime pentru coeficientul de frecare, în condițiile unei pierderi de masă și temperaturi scăzute.

5.4. Concluzii

- Utilizarea unui model ANN oferă o serie de avantaje deosebite în proiectarea materialelor de fricțiune utilizate la producerea plăcuțelor de frână.
- Pornind de la o rețetă inițială și prin efectuarea unor teste specifice astfel încât să se obțină domenii de variație cât mai mari pentru valorile de intrare - ieșire, se pot prezice performanțele pentru combinații de procentaje de masă noi sau, cel mai important, se poate stabili rețeta optimă pentru valorile de ieșire dorite.
- Deoarece ANN acceptă un nivel de eroare limitat, după stabilirea rețetei optime, este necesară efectuarea unor teste pe materialul nou în vederea validării rezultatelor.

Capitolul 6. Concluzii generale și contribuții originale

6.1. Concluzii generale

Cercetările realizate în această teză de doctorat au pornit de la ideea de tranziție către o economie circulară (producerea de materiale pentru plăcuțe de frână care să aibă o compoziție chimică bazată pe materiale de fricțiune uzate), deci de susținere a diminuării poluării mediului înconjurător. Condiția impusă a fost ca printr-o ușoară modificare a compoziției chimice (adăugarea unor noi componente chimice), cu costuri minime noile materiale propuse să aibă proprietăți cel puțin egale cu materialele inițiale.

Astfel s-a realizat un studiu amplu asupra a trei dintre materialele de fricțiune comerciale cele mai utilizate în acest moment pe autovehiculele care circulă pe drumurile din România.

Pe baza literaturii de specialitate și a analizei globale a celor trei materiale comerciale au fost propuse câteva rețete de materiale compozite de fricțiune având ca matrice pulbere de material de fricțiune uzat.

Contribuțiile generale rezultate din cercetările privind materialele de fricțiune realizate în cadrul acestei teze de doctorat pot fi rezumate astfel:

- Materialele de fricțiune se pot analiza utilizând diferite tipuri de echipamente care oferă posibilitatea de înregistrare și stocare a unor parametrii (coeficient de frecare, temperatură, etc). Analiza literaturii de specialitate arată că fiecare tehnică experimentală, aparat/echipament ori metodologie folosită prezintă anumite avantaje, dar și anumite dezavantaje. Pentru a înțelege comportamentul unor noi materiale de fricțiune, acestea trebuie suspuse mai multor tipuri de teste utilizând atât echipamente diferite, cât și condiții variate de testare.
- Analizele EDAX arată că materiale de fricțiune comerciale studiate se încadrează în categoria plăcuțelor de frână cu un conținut scăzut de metal. Materialul de fricțiune extras din plăcuțele de frână de calitate înaltă (BP-T) are cantitatea cea mai mică de conținut metalic, în timp ce materialul de fricțiune extras din plăcuțele de frână de calitate scăzută (BP-U) are cea mai mare cantitatea de conținut metalic.
- Condițiile de testare (mediu uscat, umed sau cu particule abrazive) au influență asupra comportamentului materialelor de fricțiune.
- Încercările materialelor de fricțiune în diferite medii (uscat, umed sau cu particule abrazive) arată că presiunea de frânare are o influență semnificativă asupra distanței de frânare.
- Încercările pe standul inerțial în ceea ce privește densitatea de particule eliminată în timpul frânării și a temperaturii de la suprafața discului de frână a permis identificarea unor intervale de temperatură critică, adică intervale de temperatură în care materialul de fricțiune elimină cea mai mare densitate de particule în timpul frânării.
- Analiza EDAX a particulelor reținute de filtre arată că particulele eliminate în timpul frânării au o concentrație mare de compuși metalici (Fe și Zr), iar acestea au dimensiuni ce se încadrează în categoria PM_{10} , și o mare parte dintre aceste particule se încadrează în categoria $PM_{2.5}$.

Există o tendință a particulelor fine de a adera la particulele mai mari, fenomen considerat periculos în cazul inhalării lor.

- Testele tribologice au permis stabilirea valorilor coeficientului de frecare, a rezistenței la uzură și a temperaturii din zona de contact a materialelor de fricțiune. Rezultatele obținute arată că este necesar de realizat un compromis în ceea ce privește cumulul de proprietăți coeficient de frecare – duritate – rezistență la uzură - temperatură atunci când analizăm un material de fricțiune.
- Materialul de fricțiune extras din plăcuțele de frână de calitate medie (BP-R) prezintă valori constante atât pentru COF, cât și pentru pierderea de masă, fără să ducă la o deteriorare semnificativă a contra-materialului (discul).
- Dimensiunea discului folosit pentru testele tribologice influențează temperatura din zona de contact dintre materialul de fricțiune și disc.
- Analiza SEM indică formarea platourilor primare și secundare în cazul tuturor materialelor studiate, iar cele mai mari platouri secundare sunt prezente în cazul materialului de fricțiune BP-U.
- Rezultatele testelor dinamice arată că exploatarea unui sistem de frânare convențional (fără performanțe ridicate) într-un interval de temperaturi ridicate duce la deteriorarea prematură a componentelor sistemului de frânare.
- Testele dinamice au permis identificarea temperaturii medii ($80^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$) de exploatare a unui sistem de frânare în condiții de condus normale și în regim de trafic urban.
- Testele dinamice arată că în anumite condiții (trafic urban și în unele situații de trafic extra urban) componentele uzate (plăcuțe-disc de frână) au un comportament mai bun decât unele noi, în timp ce la o viteză de deplasare de 120 km/h (autostradă) sistemul de frânare echipat cu plăcuțe și discuri de frână noi prezintă performanțe superioare.
- Pe baza tehnologiei de presare la cald a fost posibilă realizarea materialelor compozite de fricțiune din pulberi extrase din materiale uzate.
- Testele tribologice arată un comportament similar (menținerea valorii coeficientului de frecare ca cel a materialului de bază și chiar în unele cazuri îmbunătățirea lui) în cazul materialelor realizate prin procesul de reciclare cu cel al materialelor de fricțiune comerciale.
- Analiza SEM indică formarea de platouri primare mult mai mici în cazul noilor materiale de fricțiune față de materialul de bază, materialele prezentând probleme în suportarea sarcinii.
- Mecanismele de uzură identificate atât în cazul materialelor comerciale, cât și pentru cele noi sunt o combinație între abraziune între trei corpuri și adeziune.
- Analiza pe baza rețelelor neuronale artificiale indică posibilitatea prezicerii unor rețete de materiale de fricțiune care să asigure simultan condițiile tribologice impuse unor materiale de fricțiune (coeficient de frecare mare și cât mai stabil într-o gamă de temperaturi cât mai mare, rezistență mare la uzură).

Majoritatea autovehiculelor rutiere sunt utilizate în zone urbane, unde traficul și aglomerația obligă participanții la trafic să utilizeze sistemul de frânare foarte des. Dacă se ține cont de faptul că: (i) intervalul de temperatură critică în cele mai favorabile cazuri este cuprins între $60 - 110^{\circ}\text{C}$, (ii) de faptul că temperatura medie a sistemului de frânare este în jurul valorii de $80 - 110^{\circ}\text{C}$ și (iii) de faptul că doar elementele de filtrare cu o calitate premium oferă o protecție corespunzătoare împotriva particulelor eliminate în timpul frânării, atunci se poate concluziona că producătorii de filtre de cabină ar trebui să își îndrepte atenția spre dezvoltarea unor elemente filtrante care să limiteze cât mai mult posibil aceste particule și care să aibă un cost cât mai accesibil.

6.2. Contribuții originale

- Propunerea unei metodologii de testare a materialelor de fricțiune comerciale pentru înțelegere comportamentului acestor materiale în diferite condiții.
- Realizarea unei legături între diferite tipuri de studii de natură tribologică, chimică și metalurgică (studii de microscopie electronică, de porozitate, de duritate, de procesare a materialelor compozite prin presare la cald etc.) prin utilizarea unei aparaturi de cercetare moderne cu care a fost posibilă evaluarea materialelor studiate și evidențierea principalilor parametri impuși unor materiale de fricțiune.
- Îmbunătățiri aduse standului inerțial prin echiparea lui cu un sistem de achiziționare a datelor.
- Proiectarea și realizarea unui modul ce se atașează standului inerțial în vederea măsurării densității de particule eliminate în timpul frânării și care permite analizarea eficienței elementelor de filtrare a aerului din cabina autovehiculelor rutiere. Standul inerțial în acest moment este versatil și permite realizarea în același timp atât a testelor mecanice, cât și a testelor privind densitatea de particule eliminată în timpul frânării și eficiența elementelor de filtrare.
- Proiectarea și realizarea unor experimente dinamice prin utilizarea unui autoturism de clasă medie ce a fost echipat cu aparatura necesară monitorizării în timp real a condițiilor de frânare (timp, temperatură, distanță, etc.).
- Proiectarea și realizarea unui echipament de presare la cald și a metodologiei necesare în vederea realizării unor materiale de fricțiune noi.
- În cadrul prezentei teze de doctorat au fost dezvoltate și materiale noi de fricțiune ce au fost realizate în urma analizei posibilității de reciclare a materialelor de fricțiune scoase din uz.
- Completarea cu noi date experimentale a studiilor privind materiale compozite de fricțiune și a celor legate de reducerea particulelor eliminate în timpul frânării.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

În urma activității de cercetare efectuată în vederea dezvoltării prezentei teze de doctorat, se impun anumite direcții viitoare de cercetare precum:

- Studii în ceea ce privește optimizarea procesului de presare la cald și a rețetelor de materiale compozite de fricțiune în vederea îndeplinirii tuturor caracteristicilor unui material de fricțiune folosit pentru producerea plăcuțelor de frână.
- În vederea dezvoltării materialelor noi de fricțiune din plăcuțe de frână comerciale uzate (prin reciclare), pe baza rezultatelor obținute prin testarea în diferite condiții a celor trei materiale de fricțiune comerciale analizate în cadrul acestei teze de doctorat, a fost selectat materialul de fricțiune BP-R, adică materialul de fricțiune extras din plăcuțele de frână de calitate medie. Celelalte două materiale comerciale luate în studiu urmând să fie testate ulterior.
- Datorită numărului mare de producători de plăcuțe de frână ce sunt prezenți pe piața din România, o colectare selectivă a plăcuțelor de frână uzate în funcție de producător ar implica un efort financiar mare, dar și o logistică foarte bine dezvoltată. În acest sens este binevenită dezvoltarea unui material de fricțiune ce are la bază un amestec de pulbere obținută în urma procesului de reciclare a mai multor tipuri de categorii de plăcuțe de frână.
- Testarea materialelor de fricțiune dezvoltate în cadrul prezentei teze de doctorat în toate condițiile (încercări pe standul inerțial în diferite medii, în același timp analizând și densitatea

de particule eliminate în timpul frânării) în care au fost testate materialele de fricțiune comerciale, astfel încât să se obțină informații globale despre comportamentul acestora.

- Pe parcursul studiilor doctorale s-a început dezvoltarea unui stand de testare care să reproducă condițiile de încercare ce se întâlnesc în cadrul mașinii de testare de tip CHASE. Astfel se urmărește finalizarea standului și realizarea încercărilor atât pentru materialele de fricțiune comerciale cât și pe materialele dezvoltate.
- Adaptarea echipamentului de presare la cald în vederea realizării unor probe cu secțiune pătrată (în vederea utilizării acestora pe standul inerțial).
- Selectarea materialului cu rezultatele cele mai bune și adaptarea echipamentului de presare la cald în vederea realizării unor plăcuțe de frână reale.
- Realizarea unor teste dinamice cu ajutorul autoturismului în vederea validării în condiții de exploatare reale a plăcuței de frână realizată din materialul de fricțiune dezvoltat.

Lista lucrărilor publicate

I. Publicații

1. **G. Balasoiu**, V. Amortila, D. Boazu, M. Buciumeanu, Comparative evaluation of tribological properties of brake pad materials, ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, Series: Applied mathematics, Mechanics, and Engineering, Vol. 67, Special Issue IV, ISSN 1221-5872L, august, 2024 (acceptată pentru publicare).
2. Valentin Amorțilă, **George Bălăsoiu**, Madalina Rus, Silvia Vereșiu, Mihai Gingărașu, „Experimental Analysis Of The Thermal Behavior Of Brake Discs For Different Friction Couples”, Mechanical Testing and Diagnosis ISSN 2247 – 9635, 2021 (XI), Volume 4, pp. 20-23
3. V. Amorțilă, E. Mereuță, **G. Bălăsoiu**, M. Rus, S. Vereșiu, „Analysis of Failures Admitted and Not Admitted by Types of Cars as Part of Authorized Periodic Technical Inspections,” EuroEconimica, vol. 2, no. 2, pp. 171–179, 2021, <https://dj.univ-danubius.ro/index.php/EE/article/view/1453/1725>
4. V. Amorțilă, E. Mereuță, **G. Bălăsoiu**, C. Humelnicu, and M. Gingărașu, „Modeling and Simulation of a Simple Linear Suspension with Simcenter Amesim Software” EuroEconimica, vol. 2, no. 2, pp. 180–186, 2021, Link: <https://dj.univ-danubius.ro/index.php/EE/article/view/1454/1726>.[article/view/1281/1482](https://dj.univ-danubius.ro/index.php/EE/article/view/1281/1482)
5. Valentin Amorțilă, Elena Mereuță, **George Bălăsoiu**, Silvia Vereșiu, „Use of Statistical Correlation Analysis in the Study of Road Accidents”, Journal of Danubian Studies and Research, Vol. 11, No. 1/2021 pp.143-151, ISSN: 2284 – 5224, <https://dj.univ-danubius.ro/index.php/JDSR/article/view/1281/1482>
6. **George Bălăsoiu**, Valentin Amorțilă, Sorin Ciortan, Mihaela Buciumeanu, „A Statistical Analysis Of The Influence Of The Brake Pads Air Pollution On The Lung Diseases Of Romanian Population”, International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2020, Volume 20, Issue 4.2, Pages 99 – 106. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85136309176&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=5c410ce4717111c47ae1f474886c7f10&sot=aut&sdt=a&sl=18&s=AU-ID%2815838709400%29&relpos=12&citeCnt=0&searchTerm=>

II. Participări la conferințe naționale / internaționale

1. **George Bălăsoiu**, Valentin Tiberiu Amorțilă, Sorin Ciortan, Mihaela Buciumeanu, „Experimental research on the efficiency of air filters used in passenger cars”, 11th edition of the Scientific Conference organized by the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG) 8-9 iunie 2023, Galați, Romania.
2. Romeo Marin, **George Bălăsoiu**, Sorin Ciortan, „RCP scenarios-based evaluation of future wind speed evolution”, 11th edition of the Scientific Conference organized by the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG) 8-9 iunie 2023, Galați, Romania.
3. Gheorghe Stavarache, Romeo Marin, **George Bălăsoiu**, Costel Humelnicu, Sorin Ciortan, „Wind energy evolution assessment for Republic of Moldova”, 11th edition of

- the Scientific Conference organized by the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG) 8-9 iunie 2023, Galați, Romania.
4. Romeo Marin, **George Bălășoiu**, Sorin Ciortan, „*Dry abrasive wear effects on epoxy resin-based composites*”, 10th edition of the Scientific Conference organized by the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG) 9-10 iunie 2022, Galați, Romania.
 5. Romeo Marin, **George Bălășoiu**, Mihaela Buciumeanu, Sorin Ciortan, „*Offshore wind farms' locations selection with artificial neural networks*”, 10th edition of the Scientific Conference organized by the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG) 9-10 iunie 2022, Galați, Romania.
 6. **George Balasoiu**, Romeo Marin, Valentin Tiberiu Amortilă, Sorin Ciortan, Mihaela Buciumeanu, „*Experimental study on the efficiency of a brake systems*”, 10th edition of the Scientific Conference organized by the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG) 9-10 iunie 2022, Galați, Romania.
 7. Valentin-Tiberiu Amortila, Elena Mereuta, **George Balasoiu**, Monica Novetschi, „*Visual Perception Analysis Using The Kinect Sensor*”, International Conference On Contemporary Scientific And Technological Aspects Towards An Entrepreneurial Approach, 25 Februarie 2022, Galați, România.
 8. Valentin-Tiberiu Amortila, Elena Mereuta, **George Balasoiu**, Costel Humelnicu, Mihai Gingarasu, „*Analysis of the Use of Ventilated and Non-Ventilated Brake Discs using the Arduino Uno R3 Module*”, International Conference On Contemporary Scientific And Technological Aspects Towards An Entrepreneurial Approach, 25 Februarie 2022, Galați, România.
 9. **George Balasoiu**, Mihai Gingarasu, Elena Mereuta, Valentin-Tiberiu Amortila, Costel Humelnicu, „*Alternative methods for diagnosing steering systems*”, 10th edition of the Scientific Conference organized by the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG) 9-10 iunie 2022, Galați, Romania.
 10. **George Balasoiu**, Valentin Amortila, Sorin Ciortan, Mihaela Buciumeanu, „*Comparison Between Organic, Metallic and Semi-Metallic Brake Pads – a Critical Review*”, The International Conference of the Carpathian Euro-Region Specialists In Industrial Systeys, 26 Noimbrie 2021, Baia Mare, România
 11. **George Balasoiu**, Mihaela Buciumeanu, „*Development of an airborne brake wear particles measuring device*”, 9th edition of the Scientific Conference organized by the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG) 10-11 iunie 2021, Galați, Romania.
 12. **George Balasoiu**, Mihaela Buciumeanu, „*Analysis of brake pad work system of a commercial vehicle in urban traffic conditions*”, 9th edition of the Scientific Conference organized by the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG) 10-11 iunie 2021, Galați, Romania.
 13. **George Balasoiu**, Mihaela Buciumeanu, Sorin Ciortan, Valentin Amortila, „*A statistical analysis of the influence of the brake pads air pollution on the lung diseases of romanian population*”, 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020, 8-11 December, 2020, DOI: 10.5593/sgem2020V/4.2/s06.12

Bibliografie

- [1] Derwent R, Hjellbrekke A-Gunn. Air Pollution by Ozone Across Europe: Handbook of Environmental Chemistry. Luxembourg: 2019. <https://doi.org/https://doi.org/10.2800/822355>.
- [2] EEA. Air quality in Europe - 2020 report. EEA Report 2020:162.
- [3] Antoniotti M. Optimization of the AdBlue evaporation module for Scania V8 engines 2017:147.
- [4] Fulvio Amato, Alexandros Dimitropoulos, Katherine Farrow, Walid Oueslati. Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport. OECD; 2020. <https://doi.org/10.1787/4a4dc6ca-en>.
- [5] Council Directive 91/441/EEC of 26 June 1991 amending Directive 70/220/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles. OJ L 242 1991:1–106.
- [6] Directive 98/69/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998 relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles and amending Council Directive 70/220/EEC. OJ L 350 1998:1–57.
- [7] Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. OJ L 171 2007:1–16.
- [8] Commission Regulation (EU) No 459/2012 of 29 May 2012 amending Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council and Commission Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6) Text with EEA relevance. OJ L 142 2012:16–24.
- [9] Commission Regulation (EU) 2016/646 of 20 April 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6) (Text with EEA relevance). OJ L 109 2016:1–22.
- [10] Erçek E, Baydır ŞA. A Study on the Effect of Injection Amount on NOx Emissions in the Selective Catalytic Reduction (SCR) System in a Single Cylinder Diesel Engine. International Journal of Automotive Science and Technology 2023;7:37–43. <https://doi.org/10.30939/ijastech..1217346>.
- [11] Westermann A, Azambre B, Finqueneisel G, Da Costa P, Can F. Evolution of unburnt hydrocarbons under “cold-start” conditions from adsorption/desorption to conversion: On the screening of zeolitic materials. Appl Catal B 2014;158–159:48–59. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.04.005>.
- [12] Gall M. Study of SCR using Cu-Zeolite catalysts on a light-duty diesel engine under steady state and transient conditions 2015.
- [13] Grigoratos T, Martini G. Brake wear particle emissions: a review. Environmental Science and Pollution Research 2015;22:2491–504. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>.
- [14] Ahdy MA, Ali MKA, Mourad M, Abd-El-Tawwab AM. Review of automotive brake lining materials and their tribological properties. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 2022;236:1445–65. <https://doi.org/10.1177/13506501211059812>.

- [15] Shiva Shanker P. A review on properties of conventional and metal matrix composite materials in manufacturing of disc brake. *Mater Today Proc*, vol. 5, Elsevier Ltd; 2018, p. 5864–9. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.184>.
- [16] Mulani SM, Kumar A, Shaikh HNEA, Saurabh A, Singh PK, Verma PC. A review on recent development and challenges in automotive brake pad-disc system. *Mater Today Proc* 2022;56:447–54. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.410>.
- [17] Sanders PG, Xu N, Dalka TM, Maricq MM. Airborne Brake Wear Debris: Size Distributions, Composition, and a Comparison of Dynamometer and Vehicle Tests. *Environ Sci Technol* 2003;37:4060–9. <https://doi.org/10.1021/es034145s>.
- [18] Regulation (EU) 2024/1257 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7). OJ L 2024/1257 2024.
- [19] Deutz P. Circular Economy. *International Encyclopedia of Human Geography*, Second Edition 2020:193–201. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102295-5.10630-4>.
- [20] Ferdous W, Manalo A, Siddique R, Mendis P, Zhuge Y, Wong HS, et al. Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. *Resour Conserv Recycl* 2021;173:105745. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105745>.
- [21] Pilot realization of the material cycle of friction materials n.d. <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE98-ENV-D-000537/pilot-realization-of-the-material-cycle-of-friction-materials> (accessed August 30, 2024).
- [22] Lyu Y, Ma J, Åström AH, Wahlström J, Olofsson U. Recycling of worn out brake pads – impact on tribology and environment. *Sci Rep* 2020;10:1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65265-w>.
- [23] Rajaei H, Griso M, Menapace C, Dorigato A, Perricone G, Gialanella S. Investigation on the recyclability potential of vehicular brake pads. *Results in Materials* 2020;8:100161. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100161>.
- [24] Maluf O, Milan MT. Development of Materials for Automotive Disc Brakes. *Minerva* 2004;4:149–58.
- [25] Istoria pe roți n.d. <https://www.romaniaperoti.ro/stiri/istoria-pe-roti/primul-vehicul-din-lume-triciclu-cu-aburi-al-lui-cugnot-viteza-maxima-5kmh.html> (accessed May 18, 2023).
- [26] Daniel LAZE. Studii și cercetări privind îmbunătățirea sistemului de frânare la autovehicule comerciale. Universitatea Tehnică din Cluj Napoca, 2021.
- [27] Sperry EA. The Electric Brake in Practice. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 1894;XI:682–720. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1894.4763816>.
- [28] Hughes TP. Elmer Sperry: inventor and engineer. Baltimore: Johns Hopkins Press; 1971.
- [29] Clark CS, Fletcher J. *The Lanchester Legacy: A Trilogy of Lanchester Works*. Coventry University; 1995.
- [30] Harper GA, Ltd F. *Brakes and Friction Materials: The History and Development of the Technologies*. Mechanical Engineering Publications; 1998.
- [31] Frederick William Lancaster. Improvements in the brake mechanism of power-propelled road vehicles. Patent no: 26407, 1902.
- [32] Ibhadode AOA, Dagwa IM. Development of asbestos-free friction lining material from palm kernel shell. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 2008;30:166–73. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782008000200010>.
- [33] Blau PJ. Compositions, Functions, and Testing of friction Brake materials 2001;27.

- [34] Automotive Disc Brake Manual: The Complete Guide to the Theory and Practice of Automotive Disc Braking Systems. Haynes Pub. Group; 1999.
- [35] National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme (Australia). Chrysotile asbestos : full public report 1999:199.
- [36] Chan D, Stachowiak GW. Review of automotive brake friction materials. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 2004;218:953–66. <https://doi.org/10.1243/0954407041856773>.
- [37] Robert L Norton. Machine Design: An Integrated Approach. Second Edition. Prentice Hall; 2000.
- [38] Li C, Yang HI. Optimized shape for improved cooling of ventilated discs. Alexandria Engineering Journal 2023;79:556–67. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.08.035>.
- [39] Marimuthu AMT, Rakkiyannan J, Jakkamputi L, Vaithiyanathan S, Gnanasekaran S. Vibration-Based Fault Diagnosis Study on a Hydraulic Brake System Using Fuzzy Logic with Histogram Features. SDHM Structural Durability and Health Monitoring 2022;16:383–96. <https://doi.org/10.32604/SDHM.2022.011396>.
- [40] Regulation No 13 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking [2016/194] 2016:1–262.
- [41] Burciu SM. Calculul dinamic al automobilului și calculul termodinamic și dinamic al motorului - Îndrumar de proiectare – format electronic. Galati: 2016.
- [42] Szymański P, Czarnecka-Komorowska D, Gawdzińska K, Trubas A, Kostecka E. A review of composite materials used in brake disc pad manufacturing process. Composites Theory and Practice 2020;20:60–6.
- [43] Blau PJ, Jolly BC, Qu J, Peter WH, Blue CA. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes. Wear 2007;263:1202–11. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.015>.
- [44] Jacko MG, Tsang PHS, Rhee SK. Automotive friction materials evolution during the past decade. vol. 100. 1984.
- [45] V. S. AIGBODION., U. AKADIKE, S.B. HASSAN, F. ASUKE, J.O. AGUNSOYE. Development of Asbestos-Free Brake Pad Using Bagasse. Tribology in Industry 2010;32:7.
- [46] Coulibaly A, Zioui N, Bentouba S, Kelouwani S, Bourouis M. Use of thermoelectric generators to harvest energy from motor vehicle brake discs. Case Studies in Thermal Engineering 2021;28:101379. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2021.101379>.
- [47] Voloacă Ștegan, Frățilă G. Cercetări privind solicitările termice ale mecanismului de frânare și influența lor asupra siguranței circulației n.d.
- [48] Jogineedi R, Singireddy VR, Kancharla SK, Salvi SS, Jain A, Filip P. Impact of Microstructure and Surface Treatment on Thermal Properties of Gray Cast Iron Brake Rotors, 2021. <https://doi.org/10.4271/2021-01-5106>.
- [49] Vdovin A, Gustafsson M, Sebben S. A coupled approach for vehicle brake cooling performance simulations. International Journal of Thermal Sciences 2018;132:257–66. <https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2018.05.016>.
- [50] Kim Y, Sergey K, Kim H, Choi K, Lee MG. Residual stress development and thermo-elasto-plastic distortion in brake discs. Tribol Int 2023;190:109056. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109056>.
- [51] Mackin TJ, Noe SC, Ball KJJ, Bedell BCC, Bim-Merle DPP, Bingaman MCC, et al. Thermal cracking in disc brakes. Eng Fail Anal 2002;9:63–76. [https://doi.org/10.1016/S1350-6307\(00\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S1350-6307(00)00037-6).

- [52] Naji M, Al-Nimr M. Dynamic thermal behavior of a brake system. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2001;28:835–45. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(01\)00287-1](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(01)00287-1).
- [53] Yevtushenko A, Ivanyk E. Determination of heat and thermal distortion in braking systems. *Wear* 1995;185:159–65. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06610-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06610-1).
- [54] Kim SW, Park K, Lee SH, Kang KH, Lim KT. Thermophysical Properties of Automotive Metallic Brake Disk Materials. *Int J Thermophys* 2008;29:2179–88. <https://doi.org/10.1007/s10765-008-0537-3>.
- [55] Eriksson M, Jacobson S. Tribological surfaces of organic brake pads. *Tribol Int* 2000;33:817–27. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00127-4](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00127-4).
- [56] Savage G. *Carbon-Carbon Composites*. Dordrecht: Springer Netherlands; 1993. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1586-5>.
- [57] Yan HB, Feng SS, Yang XH, Lu TJ. Role of cross-drilled holes in enhanced cooling of ventilated brake discs. *Appl Therm Eng* 2015;91:318–33. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.08.042>.
- [58] Talati F, Jalalifar S. Investigation of Heat Transfer Phenomena in a Ventilated Disk Brake Rotor with Straight Radial Rounded Vanes. *Journal of Applied Sciences* 2008;8:3583–92. <https://doi.org/10.3923/jas.2008.3583.3592>.
- [59] Amortilă V, Bălășoiu G, Rus M, Vereșiu S, Gingărașu M. EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE THERMAL BEHAVIOR OF BRAKE DISCS FOR DIFFERENT FRICTION COUPLES. vol. 4. n.d.
- [60] Eriksson M, Bergman F, Jacobson S. On the nature of tribological contact in automotive brakes. *Wear* 2002;252:26–36. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00849-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00849-3).
- [61] Iulian Riposan, Mihai Chișamera. *Tehnologia Elaborării și Turnării Fontei*. București: Editura Didactică și Pedagogică; 1981.
- [62] Laurentie Sofroni, Iulian Rapoșan, Voicu Brabie, Mihai Chișamera. *Turnarea fontei*. București: Editura Didactică și Pedagogică; 1985.
- [63] Krenkel W, Berndt F. C/C-SiC composites for space applications and advanced friction systems. *Materials Science and Engineering: A* 2002;412:177–81. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.204>.
- [64] Jang GH, Cho KH, Park SB, Lee WG, Hong US, Jang H. Tribological properties of C/C-SiC composites for brake discs. *Metals and Materials International* 2010;16:61–6. <https://doi.org/10.1007/s12540-010-0061-4>.
- [65] Dwivedi R. *Development of Advanced Reinforced Aluminum Brake Rotors*, 1995. <https://doi.org/10.4271/950264>.
- [66] Nakanishi H. Development of aluminum metal matrix composites (Al-MMC) brake rotor and pad. *JSAE Review* 2002;23:365–70. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(02\)00203-5](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(02)00203-5).
- [67] Roubicek V, Raclavska H, Juchelkova D, Filip P. Wear and environmental aspects of composite materials for automotive braking industry. *Wear* 2008;265:167–75. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.09.006>.
- [68] Huang R, Deng J, Ma X, Mao Y, Fan S. Modifying C/C-SiC brake pads with different Fe-Si alloy phases to improve the wear resistance of full-carbon/ceramic brake pair. *Ceram Int* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.12.370>.
- [69] Langhof N, Rabenstein M, Rosenlöcher J, Hackenschmidt R, Krenkel W, Rieg F. Full-ceramic brake systems for high performance friction applications. *J Eur Ceram Soc* 2016;36:3823–32. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.04.040>.

- [70] Jang H, Kim SJ. The effects of antimony trisulfide (Sb_2S_3) and zirconium silicate ($ZrSiO_4$) in the automotive brake friction material on friction characteristics. *Wear* 2000;239:229–36. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00314-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00314-8).
- [71] Eriksson M, Bergman F, Jacobson S. Surface characterisation of brake pads after running under silent and squealing conditions. *Wear* 1999;232:163–7. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00141-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00141-6).
- [72] Jadhav SP, Sawant SH. A review paper: Development of novel friction material for vehicle brake pad application to minimize environmental and health issues. *Mater Today Proc* 2019;19:209–12. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.703>.
- [73] Irawan AP, Fitriyana DF, Tezara C, Siregar JP, Laksmidewi D, Baskara GD, et al. Overview of the Important Factors Influencing the Performance of Eco-Friendly Brake Pads. *Polymers (Basel)* 2022;14:1180. <https://doi.org/10.3390/polym14061180>.
- [74] Wongpayakyotin A, Jubsilp C, Tiptipakorn S, Mora P, Bielawski CW, Rimdusit S. Effects of Alkyl-Substituted Polybenzoxazines on Tribological Properties of Non-Asbestos Composite Friction Materials. *Polymers (Basel)* 2021;13:567. <https://doi.org/10.3390/polym13040567>.
- [75] Bijwe J, Aranganathan N, Sharma S, Dureja N, Kumar R. Nano-abrasives in friction materials-influence on tribological properties. *Wear* 2012;296:693–701. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.023>.
- [76] Cho KH, Jang H, Hong YS, Kim SJ, Basch RH, Fash JW. The size effect of zircon particles on the friction characteristics of brake lining materials. *Wear* 2008;264:291–7. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.03.018>.
- [77] Cho MH, Cho KH, Kim SJ, Kim DH, Jang H. The Role of Transfer Layers on Friction Characteristics in the Sliding Interface between Friction Materials against Gray Iron Brake Disks. *Tribol Lett* 2005;20:101–8. <https://doi.org/10.1007/s11249-005-8299-6>.
- [78] Xiao X, Yin Y, Bao J, Lu L, Feng X. Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering* 2016;8:168781401664730. <https://doi.org/10.1177/1687814016647300>.
- [79] Seo H, Gweon J, Lee JJ, Sohn SS, Jang H. The effect of solid lubricants in the brake friction composite on brake emissions: A case study with graphite, Sb_2S_3 , and MoS_2 . *Tribol Int* 2024;193:109413. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109413>.
- [80] Öztürk B, Ztürk SÖ, Adigüzel AA. Effect of type and relative amount of solid lubricants and abrasives on the tribological properties of brake friction materials. *Tribology Transactions* 2013;56:428–41. <https://doi.org/10.1080/10402004.2012.758333>.
- [81] Booher B. Pultrusion method of making composite friction units, 1992.
- [82] Österle W, Deutsch C, Gradt T, Orts-Gil G, Schneider T, Dmitriev AI. Tribological screening tests for the selection of raw materials for automotive brake pad formulations. *Tribol Int* 2014;73:148–55. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.01.017>.
- [83] Martinez AM, Echeberria J. Towards a better understanding of the reaction between metal powders and the solid lubricant Sb_2S_3 in a low-metallic brake pad at high temperature. *Wear* 2016;348–349:27–42. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.11.014>.
- [84] Kumar KN, Suman KNS. Review of brake friction materials for future development. *Journal of Mechanical and Mechanics Engineering* 2017;3:1–29.
- [85] Cho MH, Ju J, Kim SJ, Jang H. Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb_2S_3 , MoS_2) for automotive brake friction materials. *Wear* 2006;260:855–60. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.04.003>.
- [86] Osterle W, Prietzel C, Kloß H, Dmitriev AI. On the role of copper in brake friction materials. *Tribol Int* 2010;43:2317–26. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.08.005>.

- [87] Österle W, Dmitriev AI. The role of solid lubricants for brake friction materials. *Lubricants* 2016;4. <https://doi.org/10.3390/lubricants4010005>.
- [88] Baskara Sethupathi P, Chandradass J. Comparative study of different solid lubricants towards friction stability in a non-asbestos disc brake pad. *Industrial Lubrication and Tribology* 2021;73:897–903. <https://doi.org/10.1108/ILT-04-2021-0147>.
- [89] Barrett JC, Lamb PW, Wiseman RW. Multiple mechanisms for the carcinogenic effects of asbestos and other mineral fibers. *Environ Health Perspect* 1989;81:81–9. <https://doi.org/10.1289/ehp.898181>.
- [90] Jang H, Lee JS, Fash JW. Compositional effects of the brake friction material on creep groan phenomena. *Wear* 2001;251:1477–83. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00786-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00786-4).
- [91] Singh T, Pruncu CI, Gangil B, Singh V, Fekete G. Comparative performance assessment of pineapple and Kevlar fibers based friction composites. *Journal of Materials Research and Technology* 2020;9:1491–9. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.074>.
- [92] Park SH. Types and Health Hazards of Fibrous Materials Used as Asbestos Substitutes. *Saf Health Work* 2018;9:360–4. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2018.05.001>.
- [93] Ayogwu DO, Sintali IS, Bawa MA. A Review on Brake Pad Materials and Methods of Production. *Composite Materials* 2020;4:8–14.
- [94] Warren R. *Ceramic-Matrix Composites*. Springer; 1992nd edition (January 1, 1991); 1991.
- [95] Onyeneke FN, Anaele JU, Ugwuegbu CC. Production of Motor Vehicle Brake Pad Using Local Materials (Periwinkle and Coconut Shell). *Int J Eng Sci (Ghaziabad)* 2014:2319–1813.
- [96] Mahale V, Bijwe J, Sinha S. A step towards replacing copper in brake-pads by using stainless steel swarf. *Wear* 2019;424–425:133–42. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.019>.
- [97] Borawski A. Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads - Review. *Science and Engineering of Composite Materials* 2020;27:374–96. <https://doi.org/10.1515/secm-2020-0041>.
- [98] Critchley JP, Knight GJ, Wright WW. *Heat-resistant polymers: technologically useful materials*. New York SE - Xiv, 462 Pages: Illustrations; 24 Cm: Plenum Press New York; 1983. <https://doi.org/https://worldcat.org/title/9324976>.
- [99] Jubsilp C, Jantaramaha J, Mora P, Rimdusit S. Tribological performance and thermal stability of nanorubber-modified polybenzoxazine composites for non-asbestos friction materials. *Polymers (Basel)* 2021;13:2435. <https://doi.org/10.3390/polym13152435>.
- [100] Kurihara S, Idei H, Aoyagi Y, Kuroe M. Binder resin for friction material, binder resin composition for friction material, composite material for friction material containing the same, friction material and production method thereof 2012.
- [101] Fu Z, Suo B, Yun R, Lu YY, Wang H, Qi S, et al. Development of eco-friendly brake friction composites containing flax fibers. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2012;31:681–9. <https://doi.org/10.1177/0731684412442258>.
- [102] Marc A. Yesnik. *Friction material comprising powdered phenolic resin and method of making same*, 1996.
- [103] Lamport RA, Biermann-Weaver JM, Jain VK, Shih PT-K. *Resin mixture for friction materials* 1998.
- [104] Guo Y, Chen X, Wu G, Huang S. Tunable Thermal, Mechanical, and Tribological Properties of Polybenzoxazine-Based Composite for Vehicle Applications. *Coatings* 2023;13:1147. <https://doi.org/10.3390/coatings13071147>.

- [105] Kiskan B, Yagci Y. Benzoxazine resins as smart materials and future perspectives. *Thermosets*, Elsevier; 2018, p. 543–76. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101021-1.00017-4>.
- [106] Ishida H. PROCESS FOR PREPARATION OF BENZOXAZINE COMPOUNDS IN SOLVENTILESS SYSTEMS 1996.
- [107] Komori T, Miyake S. Brake-friction material, 1990.
- [108] Kakegawa H, Yasuda T, Wang X. Binder composition for friction materials, and friction material, 1999.
- [109] Nagahiro T, Unemoto N. Polyimide based friction material and preparation process of the material, 1993.
- [110] AVALLONE EA, III TB. Marks' standard handbook for mechanical engineers. *Choice Reviews Online* 1997;34:34-3330-34–3330. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.34-3330>.
- [111] Peter H. Tsang; P. Coyle; Warren; Tung Liu GVanderPoorte. Method of manufacturing a friction article. US Patent 4944373 1985.
- [112] Lam RC, Chen Y-F. Carbon deposit friction lining material. US Patent 5856244 1999.
- [113] Kumar M, Bijwe J. NAO friction materials with various metal powders: Tribological evaluation on full-scale inertia dynamometer. *Wear* 2010;269:826–37. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.08.011>.
- [114] Aranganathan N, Bijwe J. Comparative performance evaluation of NAO friction materials containing natural graphite and thermo-graphite. *Wear* 2016;358–359:17–22. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.032>.
- [115] Davin EAT, Cristol AL, Beaurain A, Dufrenoy P, Zaquen N. Differences in wear and material integrity of nao and low-steel brake pads under severe conditions. *Materials* 2021;14. <https://doi.org/10.3390/ma14195531>.
- [116] Kumar N, Bharti A, Goyal HS, Patel KK. The evolution of brake friction materials: A review. *Materials Physics and Mechanics* 2021;47:796–815. <https://doi.org/10.18149/MPM.4752021.13>.
- [117] Cai R, Zhang J, Nie X, Tjong J, Matthews DTA. Wear mechanism evolution on brake discs for reduced wear and particulate emissions. *Wear* 2020;452–453:203283. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203283>.
- [118] Figi R, Nagel O, Tuchs Schmid M, Lienemann P, Gfeller U, Bukowiecki N. Quantitative analysis of heavy metals in automotive brake linings: A comparison between wet-chemistry based analysis and in-situ screening with a handheld X-ray fluorescence spectrometer. *Anal Chim Acta* 2010;676:46–52. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.07.031>.
- [119] Günay M, Korkmaz ME, Özmen R. An investigation on braking systems used in railway vehicles. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2020;23:421–31. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.01.009>.
- [120] Peng T, Yan Q, Zhang X, Zhuang Y. Role of titanium carbide and alumina on the friction increment for Cu-based metallic brake pads under different initial braking speeds. *Friction* 2021;9:1543–57. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0439-3>.
- [121] Xiao Y, Zhang Z, Yao P, Fan K, Zhou H, Gong T, et al. Mechanical and tribological behaviors of copper metal matrix composites for brake pads used in high-speed trains. *Tribol Int* 2018;119:585–92. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.11.038>.
- [122] El-Hija HA, Krenkel W, Hugel S. Development of C/C-SiC brake pads for high-performance elevators. *Int J Appl Ceram Technol* 2005;2:105–13. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2005.02012.x>.

- [123] Tressler RE. Recent developments in fibers and interphases for high temperature ceramic matrix composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 1999;30:429–37. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00131-6).
- [124] Unal A, Demirdalmis O. The effects of using apricot kernel shell, an environmentally friendly material, in composite brake pads on friction performance. *Tribol Int* 2024;197. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109734>.
- [125] Liew KW, Nirmal U. Frictional performance evaluation of newly designed brake pad materials. *Mater Des* 2013;48:25–33. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.055>.
- [126] Kumar S, Ghosh SK. Porosity and tribological performance analysis on new developed metal matrix composite for brake pad materials. *J Manuf Process* 2020;59:186–204. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.053>.
- [127] Ria T, Soib M, Kasir R. Selection of Best Formulation for Semi-Metallic Brake Friction Materials Development. *Powder Metallurgy* 2012. <https://doi.org/10.5772/33909>.
- [128] Marin E, Daimon E, Boschetto F, Rondinella A, Inada K, Zhu W, et al. Diagnostic spectroscopic tools for worn brake pad materials: A case study. *Wear* 2019;432–433:202969. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202969>.
- [129] Chandra Verma P, Menapace L, Bonfanti A, Ciudin R, Gialanella S, Straffelini G. Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments. *Wear* 2015;322–323:251–8. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.11.019>.
- [130] Masotti D, Neis P, Ferreira N, Gomes K, Poletto J, Matozo L. Experimental Evaluation of Surface Morphology Characteristics During Stick-Slip Process at Low Speed Sliding Test. *SAE Technical Papers*, vol. 2015- Septe, 2015, p. 2020. <https://doi.org/10.4271/2015-01-2685>.
- [131] A. E. Anderson. *Wear of Brake Materials*. *Wear Control Handbook*, American Society of Mechanical Engineers; 1980, p. 843–57.
- [132] Tavangar R, Moghadam HA, Khavandi A, Banaeifar S. Comparison of dry sliding behavior and wear mechanism of low metallic and copper-free brake pads. *Tribol Int* 2020;151:106416. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106416>.
- [133] Nicholson G. *Facts about Friction: A Friction Material Manual Almost All You Need to Know about Manufacturing*. Gedoran; 1995.
- [134] Shin MW, Kim JW, Joo BS, Jang H. Wear and Friction-Induced Vibration of Brake Friction Materials with Different Weight Average Molar Mass Phenolic Resins. *Tribol Lett* 2015;58. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0486-5>.
- [135] Jang H, Kim SJ. BRAKE FRICTION MATERIALS. *Polymer Tribology*, IMPERIAL COLLEGE PRESS; 2009, p. 506–32. https://doi.org/doi:10.1142/9781848162044_0015.
- [136] Cho MH, Kim SJ, Kim D, Jang H. Effects of ingredients on tribological characteristics of a brake lining: An experimental case study. *Wear* 2005;258:1682–7. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.021>.
- [137] Federici M, Gialanella S, Leonardi M, Perricone G, Straffelini G. A preliminary investigation on the use of the pin-on-disc test to simulate off-brake friction and wear characteristics of friction materials. *Wear* 2018;410–411:202–9. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.07.011>.
- [138] Verma PC, Ciudin R, Bonfanti A, Aswath P, Straffelini G, Gialanella S. Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material. *Wear* 2016;346–347:56–65. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.11.004>.
- [139] Federici M, Straffelini G, Gialanella S. Pin-on-Disc Testing of Low-Metallic Friction Material Sliding Against HVOF Coated Cast Iron: Modelling of the Contact Temperature Evolution. *Tribol Lett* 2017;65:1–12. <https://doi.org/10.1007/s11249-017-0904-y>.

- [140] Shen M xue, Li H xin, Du JH, Ji DH, Liu S peng, Xiao Y long. New insights into reducing airborne particle emissions from brake materials: Grooved textures on brake disc surface. *Tribol Int* 2022;174:107721. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107721>.
- [141] Österle W, Dörfel I, Prietzel C, Rooch H, Cristol-Bulthé A-L, Degallaix G, et al. A comprehensive microscopic study of third body formation at the interface between a brake pad and brake disc during the final stage of a pin-on-disc test. *Wear* 2009;267:781–8. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.023>.
- [142] Fan S, Zhang L, Cheng L, Tian G, Yang S. Effect of braking pressure and braking speed on the tribological properties of C/SiC aircraft brake materials. *Compos Sci Technol* 2010;70:959–65. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.02.012>.
- [143] Djafri M, Bouchetara M, Busch C, Khatir S, Khatir T, Weber S, et al. Influence of Thermal Fatigue on the Wear Behavior of Brake Discs Sliding against Organic and Semimetallic Friction Materials. *Tribology Transactions* 2018;61:861–8. <https://doi.org/10.1080/10402004.2018.1437491>.
- [144] SU J, XIAO Z, LIU Y, MENG F, PENG Z, GU L, et al. Preparation and characterization of carbon/carbon aircraft brake materials with long service life and good frictional properties. *New Carbon Materials* 2010;25:329–34. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(09\)60037-8](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(09)60037-8).
- [145] Shin MW, Cho KH, Lee WK, Jang H. Tribological characteristics of binder resins for brake friction materials at elevated temperatures. *Tribol Lett* 2010;38:161–8. <https://doi.org/10.1007/s11249-010-9586-4>.
- [146] ***SAE J661. Brake lining quality test procedure. 1997.
- [147] Zhang S, Wang F. Comparison of friction and wear performances of brake materials containing different amounts of ZrSiO₄ dry sliding against SiCp reinforced Al matrix composites. *Materials Science and Engineering A* 2007;443:242–7. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.054>.
- [148] Tomášek V, Kratošová G, Yun R, Fan Y, Lu Y. Effects of zirconium silicate in nonmetallic brake friction materials on friction performance. *J Mater Sci* 2009;44:266–73. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-3041-z>.
- [149] Saurabh A, Verma PC, Dhir A, Sikder J, Saravanan P, Tiwari SK, et al. Enhanced tribological performance of MoS₂ and hBN-based composite friction materials: Design of tribo-pair for automotive brake pad-disc systems. *Tribol Int* 2024;199. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110001>.
- [150] Jamasri, Rochardjo H, Nawangsari P, Waskito AT. Friction modifiers optimization on tribological properties of non-asbestos organic (Nao) brake pad by doe-taguchi method. *Tribology in Industry* 2021;43:310–20. <https://doi.org/10.24874/ti.1044.01.21.04>.
- [151] Lee JJ, Lee JA, Kwon S, Kim JJ. Effect of different reinforcement materials on the formation of secondary plateaus and friction properties in friction materials for automobiles. *Tribol Int* 2018;120:70–9. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.020>.
- [152] Sathyamoorthy G, Vijay R, Singaravelu DL. A comparative study on tribological characterisations of different abrasives based non-asbestos brake friction composites. *Mater Today Proc* 2022;56:661–8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.065>.
- [153] Cai P, Wang Y, Wang T, Wang Q. Improving tribological behaviors of friction material by mullite. *Tribol Int* 2015;93:282–8. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.09.039>.
- [154] Hwan Park J, Oh Chung J, Rae Kim H. Friction characteristics of brake pads with aramid fiber and acrylic fiber. *Industrial Lubrication and Tribology* 2010;62:91–8. <https://doi.org/10.1108/00368791011025638>.

- [155] Elzayady N, Elsoeudy R. Microstructure and wear mechanisms investigation on the brake pad. *Journal of Materials Research and Technology* 2021;11:2314–35. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.045>.
- [156] Bhushan B. *Principles and Applications of Tribology*. Wiley; 1999.
- [157] Gupta BR. Friction and wear mechanism of polymers, their composites and nanocomposites. *Tribology of Polymers, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites* 2023:51–117. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90748-4.00012-1>.
- [158] Stachowiak GW, Batchelor AW. *Engineering Tribology*. Elsevier Science; 1993.
- [159] Sarath PS, Reghunath R, Haponiuk JT, Thomas S, George SC. Introduction: A journey to the tribological behavior of polymeric materials. *Tribology of Polymers, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites* 2023:1–16. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90748-4.00010-8>.
- [160] *Friction and wear*. *Smithells Metals Reference Book*, Elsevier; 2004, p. 25-1-25–6. <https://doi.org/10.1016/B978-075067509-3/50028-2>.
- [161] Yadav R, Meena A, Lee H-H, Lee S-Y, Park S-J. Tribological behavior of dental resin composites: A comprehensive review. *Tribol Int* 2023;190:109017. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109017>.
- [162] Bhushan Bharat. *Introduction to tribology*. Wiley; 2013.
- [163] Ali MKA, Makrahy MM. Tribological performance evaluation of automotive brake discs manufactured from boron-doped titanium dioxide-reinforced aluminum composite. *Measurement (Lond)* 2024;224. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113835>.
- [164] Wang WJ, Wang F, Gu KK, Ding HH, Wang HY, Guo J, et al. Investigation on braking tribological properties of metro brake shoe materials. *Wear* 2015;330–331:498–506. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.057>.
- [165] Pleil JD, Ariel Geer Wallace M, Davis MD, Matty CM. The physics of human breathing: Flow, timing, volume, and pressure parameters for normal, on-demand, and ventilator respiration. *J Breath Res* 2021;15:042002. <https://doi.org/10.1088/1752-7163/ac2589>.
- [166] Gasser M, Riediker M, Mueller L, Perrenoud A, Blank F, Gehr P, et al. Toxic effects of brake wear particles on epithelial lung cells in vitro. *Part Fibre Toxicol* 2009;6:30. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-6-30>.
- [167] Perez L, Medina-Ramón M, Künzli N, Alastuey A, Pey J, Pérez N, et al. Size Fractionate Particulate Matter, Vehicle Traffic, and Case-Specific Daily Mortality in Barcelona, Spain. *Environ Sci Technol* 2009;43:4707–14. <https://doi.org/10.1021/es8031488>.
- [168] Balasoiu G, Buciumeanu M, Ciortan S, Amortila V. A Statistical Analysis of the Influence of the Brake Pads Air Pollution on the Lung Diseases of Romanian Population. *20th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings 2020*, vol. 20, 2020, p. 99–106. <https://doi.org/10.5593/sgem2020v/4.2/s06.12>.
- [169] EEA (European Environment Agency). *Air quality in Europe — 2019 Report*. Luxembourg; 2019. <https://doi.org/10.2800/822355>.
- [170] EEA (European Environment Agency) n.d. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exceedance-of-air-quality-limit-3/assessment-5> (accessed October 20, 2020).
- [171] Borawski A. Simulation Study of the Process of Friction in the Working Elements of a Car Braking System at Different Degrees of Wear. *Acta Mechanica et Automatica* 2018;12:221–6. <https://doi.org/10.2478/ama-2018-0034>.
- [172] Singh SP. Analysis of Brake-Pad Friction Material Formulation. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)* 2015;2:6–13.
- [173] Suresh PN, Patil RJ, ... Study of friction and wear for optimization of disc brake material for reduction of brake sound. *International Journal of ...* 2014.

- [174] Ibukun Olabisi. A. Development and Assessment of Composite Brake Pad Using Pulverized Cocoa Beans Shells Filler. *International Journal of Materials Science and Applications* 2016;5:66. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20160502.16>.
- [175] Sekunowo OI, Durowaye SI, Lawal GI. Synthesis and characterisation of iron millscale particles reinforced ceramic matrix composite. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 2019;31:78–85. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.03.003>.
- [176] Stadler Z, Krnel K, Kosmac T. Friction behavior of sintered metallic brake pads on a C/C-SiC composite brake disc. *J Eur Ceram Soc* 2007;27:1411–7. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.032>.
- [177] Craciun AL, Pinca-Bretotean C, Utu D, Josan A. Tribological properties of nonasbestos brake pad material by using coconut fiber n.d. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/163/1/012014>.
- [178] Wang F, Liu Y. Mechanical and tribological properties of ceramic-matrix friction materials with steel fiber and mullite fiber. *Mater Des* 2014;57:449–55. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.017>.
- [179] Akramifard H, Ghasemi Z. Friction and Wear Properties of a New Semi-Metallic Brake Pad According to SAE J 661: A Case Study in PARSLENT Complex (Iran). *International Journal of New Technology and Research* 2016;2:263573.
- [180] Zheng K, Lin Y, Lai T, Gao C, Liu M, Ren Z. Replacing copper in composites with waste foundry sand: A novel approach for Cu-free resin-based braking material. *Tribol Int* 2024;191:109110. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2023.109110>.
- [181] Potanin AY, Pogozhev YS, Loginov PA, Patsera EI, Rupasov SI, Levashov EA. Chemical conversion during transient liquid-phase hot pressing of TaSi₂-TaC-SiC SHS-powder. *Ceram Int* 2023;49:21839–47. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2023.04.006>.
- [182] Neuman EW, Hilmas GE, Fahrenholtz WG. Transition metal diboride-silicon carbide-boron carbide ceramics with super-high hardness and strength. *J Eur Ceram Soc* 2022;42:6795–801. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2022.08.019>.
- [183] Varriale F, Carlevaris D, Wahlström J, Malmberg V, Lyu Y. On the impact of pad material ingredients on particulate wear emissions from disc brakes. *Results in Engineering* 2023;19. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101397>.
- [184] Wang Z, Wang J, Cao F, Ma Y. Comparative braking performance evaluation of a commercial and non-asbestos, cu-free, carbonized friction composites. *Medziagotyra* 2021;27:197–204. <https://doi.org/10.5755/j02.ms.23525>.
- [185] Wei L, Choy YS, Cheung CS, Jin D. Tribology performance, airborne particle emissions and brake squeal noise of copper-free friction materials. *Wear* 2020;448–449:203215. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203215>.
- [186] Malachova K, Kukutschova J, Rybkova Z, Sezimova H, Placha D, Cabanova K, et al. Toxicity and mutagenicity of low-metallic automotive brake pad materials. *Ecotoxicol Environ Saf* 2016;131:37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.05.003>.
- [187] Wang D, Yin J, Zhu Z, Zhang D, Liu D, Liu H, et al. Preparation of high friction brake shoe material and its tribological behaviors during emergency braking in ultra-deep coal mine hoist. *Wear* 2020;458–459:203391. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203391>.
- [188] Gomes Nogueira AP, Bagolan P, Leonardi M, Gialanella S, Straffelini G. The role of scorching treatment on the wear and emission behavior of friction materials with and without copper. *Wear* 2020;460–461:203480. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203480>.

- [189] Balaji P, B. SR. Effective utilization of high-temperature sulfides in coated form on steel fibers for brake pad application and evaluating its tribological performance. *Tribol Int* 2023;188:108869. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108869>.
- [190] Singh T. Optimum design based on fabricated natural fiber reinforced automotive brake friction composites using hybrid CRITIC-MEW approach. *Journal of Materials Research and Technology* 2021;14:81–92. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.051>.
- [191] Manoharan S, Vijay R, Lenin Singaravelu D, Kchaou M. Experimental Investigation on the Tribo-Thermal Properties of Brake Friction Materials Containing Various Forms of Graphite: A Comparative Study. *Arab J Sci Eng* 2019;44:1459–73. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3590-7>.
- [192] Kchaou M, Sellami A, Fajoui J, Kus R, Elleuch R, Jacquemin F. Tribological performance characterization of brake friction materials: What test? What coefficient of friction? *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 2019;233:214–26. <https://doi.org/10.1177/1350650118764167>.
- [193] Bezzazi M, Khamlichi A, Jabbouri A, Reis P, Davim JP. Experimental characterization of frictional behaviour of clutch facings using Pin-on-disk machine. *Mater Des* 2007;28:2148–53. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.07.001>.
- [194] Hee KW, Filip P. Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings. *Wear* 2005;259:1088–96. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.083>.
- [195] Lu Y, Tang CF, Wright MA. Optimization of a commercial brake pad formulation. *J Appl Polym Sci* 2002;84:2498–504. <https://doi.org/10.1002/app.10606>.
- [196] TUSZYŃSKI W, GIBAŁA M, GOSPODARCZYK A, KOZIOŁ S, MATECKI K, PIEKOSZEWSKI W, et al. THE NEW INERTIA DYNAMOMETER FOR FRICTION AND WEAR TESTING OF BRAKE PADS AND BRAKE DISCS. *Tribologia* 2019;286:113–9. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.5972>.
- [197] Straffelini G, Verma PC, Metinoz I, Ciudin R, Perricone G, Gialanella S. Wear behavior of a low metallic friction material dry sliding against a cast iron disc: Role of the heat-treatment of the disc. *Wear* 2016;348–349:10–6. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.11.020>.
- [198] YAVUZ H, BAYRAKÇEKEN H. Investigation of Friction and Wear Behavior of Composite Brake Pads Produced with Huntite Mineral. *International Journal of Automotive Science And Technology* 2022;6:9–16. <https://doi.org/10.30939/ijastech..1022247>.
- [199] Ashby MF, Lim SC. Wear-mechanism maps. *Scripta Metallurgica et Materialia* 1990;24:805–10. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(90\)90116-X](https://doi.org/10.1016/0956-716X(90)90116-X).
- [200] Ostermeyer GP. On the dynamics of the friction coefficient. *Wear* 2003;254:852–8. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00235-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00235-7).
- [201] ***ASTM G99. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus n.d. <https://doi.org/10.1520/G0099-17>.
- [202] Veeresh Kumar GB, Pramod R, Rao CSP, Gouda PSS. Artificial Neural Network Prediction on Wear of Al6061 Alloy Metal Matrix Composites Reinforced With-Al₂O₃. *Mater Today Proc* 2018;5:11268–76. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.093>.
- [203] Pramod R, Veeresh Kumar GB, Gouda PSS, Mathew AT. A Study on the Al₂O₃ reinforced Al7075 Metal Matrix Composites Wear behavior using Artificial Neural Networks. *Mater Today Proc* 2018;5:11376–85. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.105>.
- [204] Conshohocken W. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus 1. *Wear* 2007:1–5.

- [205] Muzathik AM. Effect of Boron on Friction and Temperature Characteristics of Brake Pad Materials. n.d.
- [206] Singh T. Utilization of cement bypass dust in the development of sustainable automotive brake friction composite materials. *Arabian Journal of Chemistry* 2021;14:103324. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103324>.
- [207] Öktem H, Uygur I, Çevik M. Design, construction and performance of a novel brake pad friction tester. *Measurement (Lond)* 2018;115:299–305. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.058>.
- [208] Taylor RH, Holt WL. Small inertia-type machine for testing brake lining. *J Res Natl Bur Stand (1934)* 1940;24:531. <https://doi.org/10.6028/jres.024.031>.
- [209] Kukutschová J, Roubíček V, Malachová K, Pavlíčková Z, Holuša R, Kubačková J, et al. Wear mechanism in automotive brake materials, wear debris and its potential environmental impact. *Wear* 2009;267:807–17. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.034>.
- [210] Aranganathan N, Mahale V, Bijwe J. Effects of aramid fiber concentration on the friction and wear characteristics of non-asbestos organic friction composites using standardized braking tests. *Wear* 2016;354–355:69–77. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.002>.
- [211] Aleksendrić D, Barton DC, Vasić B. Prediction of brake friction materials recovery performance using artificial neural networks. *Tribol Int* 2010;43:2092–9. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.05.013>.
- [212] Singaravelu DL, Vijay R, Filip P. Influence of various cashew friction dusts on the fade and recovery characteristics of non-asbestos copper free brake friction composites. *Wear* 2019;426–427:1129–41. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.036>.
- [213] Weitao S, Bin W, Xiaoliang L, Yuqian W, Jian Z. Controlling the tribology performance of gray cast iron by tailoring the microstructure. *Tribol Int* 2022;167:107343. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107343>.
- [214] Zhong C, Sun J, Liu Z, Niu H, Zhang J, Liang X, et al. Size distribution of brake wear particulate matter based on a brake dynamometer investigation 2024. <https://doi.org/10.3389/ffutr.2024.1407660>.
- [215] Asif M. *Tribo-evaluation of Aluminium Based Metal Matrix Composites Used for Automobile Brake Pad Applications*. vol. 1. 2012.
- [216] Lee WK, Rhee TH, Kim HS, Jang H. Effects of antimony trisulfide (Sb₂S₃) on sliding friction of automotive brake friction materials. *Metals and Materials International* 2013;19:1101–7. <https://doi.org/10.1007/s12540-013-5027-x>.
- [217] Kim SH, Jang H. Friction and vibration of brake friction materials reinforced with chopped glass fibers. *Tribol Lett* 2013;52:341–9. <https://doi.org/10.1007/s11249-013-0221-z>.
- [218] Lee EJ, Hwang HJ, Lee WG, Cho KH, Jang H. Morphology and toughness of abrasive particles and their effects on the friction and wear of friction materials: A case study with zircon and quartz. *Tribol Lett* 2010;37:637–44. <https://doi.org/10.1007/s11249-009-9561-0>.
- [219] Singh T, Patnaik A, Satapathy BK. Friction braking performance of nanofilled hybrid fiber reinforced phenolic composites: Influence of nanoclay and carbon nanotubes. *Nano* 2013;8. <https://doi.org/10.1142/S1793292013500252>.
- [220] Chapman TR, Niesz DE, Fox RT, Fawcett T. Wear-resistant aluminum–boron–carbide cermets for automotive brake applications. *Wear* 1999;236:81–7. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00259-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00259-8).

- [221] Amorțilă V, Mereuță E, Bălășoiu G, Rus M, Vereșiu S. Analysis of Failures Admitted and Not Admitted by Types of Cars as Part of Authorized Periodic Technical Inspections. *EuroEconimica* 2021;2:171–9.
- [222] Li J, Zha X, Wu D. The Theoretical Analysis of Test Result's Errors for the Roller Type Automobile Brake Tester, 2011, p. 382–9. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18369-0_44.
- [223] Ilie F, Cristescu AC. Experimental Study of the Correlation between the Wear and the Braking System Efficiency of a Vehicle. *Applied Sciences (Switzerland)* 2023;13. <https://doi.org/10.3390/app13148139>.
- [224] Senabre C, Velasco E, Valero S. Wheel diameter and width influence in variability of brake data measurement at Ministry of Transport facilities. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* 2016;10:819–23.
- [225] Olmeda E, Garrosa M, Sánchez SS, Díaz V. Development and Characterization of a Compact Device for Measuring the Braking Torque of a Vehicle. *Sensors (Basel)* 2020;20:4278. <https://doi.org/10.3390/s20154278>.
- [226] Pinca-Bretotean C, Josan A, Putan V. Testing of brake pads made of non asbestos organic friction composite on specialized station. *Mater Today Proc* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.039>.
- [227] Farwick zum Hagen FH, Mathissen M, Grabiec T, Hennicke T, Rettig M, Grochowicz J, et al. On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions. *Atmos Environ* 2019;217:116943. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116943>.
- [228] Kwak J, Lee S, Lee S. On-road and laboratory investigations on non-exhaust ultrafine particles from the interaction between the tire and road pavement under braking conditions. *Atmos Environ* 2014;97:195–205. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.014>.
- [229] Oroumiyeh F, Zhu Y. Brake and tire particles measured from on-road vehicles: Effects of vehicle mass and braking intensity. *Atmos Environ X* 2021;12:100121. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100121>.
- [230] Straffelini G, Gialanella S. Airborne particulate matter from brake systems: An assessment of the relevant tribological formation mechanisms. *Wear* 2021;478–479:203883. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203883>.
- [231] Mathissen M, Grigoratos T, Lahde T, Vogt R. Brake Wear Particle Emissions of a Passenger Car Measured on a Chassis Dynamometer. *Atmosphere (Basel)* 2019;10:556. <https://doi.org/10.3390/atmos10090556>.
- [232] George BĂLĂȘOIU. Proiectarea și realizarea unui stand pentru studiu experimental privind eficiența frânelor cu disc. Universitatea "Dunarea de Jos" din Galați, n.d.
- [233] George Bălășoiu. Studii asupra materialelor pentru plăcuțele de frână. Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, 2020.
- [234] Kukutschová J, Moravec P, Tomášek V, Matějka V, Smolík J, Schwarz J, et al. On airborne nano/micro-sized wear particles released from low-metallic automotive brakes. *Environmental Pollution* 2011;159:998–1006. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.11.036>.
- [235] Iijima A, Sato K, Yano K, Kato M, Kozawa K, Furuta N. Emission factor for antimony in brake abrasion dusts as one of the major atmospheric antimony sources. *Environ Sci Technol* 2008;42:2937–42. <https://doi.org/10.1021/es702137g>.
- [236] Canu M, Galvis B, Morales R, Ramírez O, Madelin M. Understanding the Shinyei PPD24NS low-cost dust sensor. 2018 IEEE International Conference on Environmental

- Engineering, EE 2018 - Proceedings 2018:1–10. <https://doi.org/10.1109/EE1.2018.8385268>.
- [237] Balasoiu G, Amortila V, Boazu D, Buciumeanu M. Comparative evaluation of tribological properties of brake pad materials. ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering 2024;67.
- [238] Sarnago H, Mediano A, Lucia Ó. High Efficiency AC–AC Power Electronic Converter Applied to Domestic Induction Heating. IEEE Trans Power Electron 2012;27:3676–84. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2185067>.
- [239] Tanriseven S, Ugur N, Kanak A, Ergun S. ERINOKS: EneRgy-Efficient INduction-Based Food Processing for Optimized KitchenS. 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), IEEE; 2019, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2019.8702571>.
- [240] Lucia O, Maussion P, Dede EJ, Burdio JM. Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2014;61:2509–20. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>.
- [241] Sabale S, Jadhav V, Khot V, Zhu X, Xin M, Chen H. Superparamagnetic MFe₂O₄ (M = Ni, Co, Zn, Mn) nanoparticles: synthesis, characterization, induction heating and cell viability studies for cancer hyperthermia applications. J Mater Sci Mater Med 2015;26:127. <https://doi.org/10.1007/s10856-015-5466-7>.
- [242] Ghosh R, Pradhan L, Devi YP, Meena SS, Tewari R, Kumar A, et al. Induction heating studies of Fe₃O₄ magnetic nanoparticles capped with oleic acid and polyethylene glycol for hyperthermia. J Mater Chem 2011;21:13388. <https://doi.org/10.1039/c1jm10092k>.
- [243] Singh MK, Singh A. Scanning electron microscope. Characterization of Polymers and Fibres, Elsevier; 2022, p. 387–419. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823986-5.00008-7>.
- [244] Szyrkowska MI. MICROSCOPY TECHNIQUES | Scanning Electron Microscopy. Encyclopedia of Analytical Science, Elsevier; 2005, p. 134–43. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00385-X>.
- [245] Karak N. Fundamentals of Nanomaterials and Polymer Nanocomposites. Nanomaterials and Polymer Nanocomposites, Elsevier; 2019, p. 1–45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814615-6.00001-1>.
- [246] Omid M, Fatehinya A, Farahani M, Akbari Z, Shahmoradi S, Yazdian F, et al. Characterization of biomaterials. Biomaterials for Oral and Dental Tissue Engineering, Elsevier; 2017, p. 97–115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100961-1.00007-4>.
- [247] Wahlström J, Gventsadze D, Olander L, Kutelia E, Gventsadze L, Tsursumia O, et al. A pin-on-disc investigation of novel nanoporous composite-based and conventional brake pad materials focussing on airborne wear particles. Tribol Int 2011;44:1838–43. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.07.008>.
- [248] Darius GS, Berhan MN, David N V, Shahrul AA, Zaki MB. Characterization of brake pad friction materials. Computational Methods and Experiments in Materials Characterisation II 2005;51:43–50.
- [249] Xiao G, Zhu Z. Friction materials development by using DOE/RSM and artificial neural network. Tribol Int 2010;43:218–27. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.05.019>.
- [250] Lawal SS, Ademoh NA, Bala KC, Abdulrahman AS. A Review of the Compositions, Processing, Materials and Properties of Brake Pad Production. J Phys Conf Ser 2019;1378:032103. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/3/032103>.
- [251] Ernest Rabinowicz. Friction and Wear of Materials, 2nd Edition. Wiley; 1995.

- [252] Mirzababaei S, Filip P. Impact of humidity on wear of automotive friction materials. *Wear* 2017;376–377:717–26. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2017.02.020>.
- [253] Kchaou M, Mat Lazim AR, Abdul Hamid MK, Abu Bakar AR. Experimental studies of friction-induced brake squeal: Influence of environmental sand particles in the interface brake pad-disc. *Tribol Int* 2017;110:307–17. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.02.032>.
- [254] Bondorf L, Köhler L, Grein T, Epple F, Philipps F, Aigner M, et al. Airborne Brake Wear Emissions from a Battery Electric Vehicle. *Atmosphere (Basel)* 2023;14. <https://doi.org/10.3390/atmos14030488>.
- [255] Park J, Song W, Gweon J, Seo H, Lee JJ, Jang H. Size effect of zircon particles in brake pads on the composition and size distribution of emitted particulate matter. *Tribol Int* 2021;160:106995. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106995>.
- [256] Archard JF. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *J Appl Phys* 1953;24:981–8. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>.
- [257] Luborsky FE, Livingston JD, Chin GY. Magnetic properties of metals and alloys. *Physical Metallurgy*, Elsevier; 1996, p. 2501–65. <https://doi.org/10.1016/B978-044489875-3/50034-X>.
- [258] Dong Y, Zou K, Liang R, Zhou Z. Review of BiScO₃-PbTiO₃ piezoelectric materials for high temperature applications: fundamental, progress, and perspective. *Prog Mater Sci* 2023;132:101026. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101026>.
- [259] Boz M, Kurt A. Effect of ZrSiO₄ on the Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials. vol. 23. 2007.
- [260] Lu Y. A combinatorial approach for automotive friction materials: Effects of ingredients on friction performance. *Compos Sci Technol* 2006;66:591–8. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.032>.
- [261] Baskara Sethupathi P, Chandradass J. Effect of zirconium silicate and mullite with three different particle sizes on tribo performance in a non-asbestos brake pad. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 2022;236:314–25. <https://doi.org/10.1177/13506501211005927>.
- [262] Jang H, Ko K, Kim SJ, Basch RH, Fash JW. The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. *Wear* 2004;256:406–14. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00445-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00445-9).
- [263] Gurney Kevin. *An Introduction to Neural Networks*. CRC Press; 2014.
- [264] Hristev RM. *The ANN Book*. 1998.
- [265] Anderson D, McNeill G. *ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TECHNOLOGY*. 1992.
- [266] Hui Chi-Leung. *Artificial Neural Networks - Applications*. IntechOpen; 2011.
- [267] Hagan Martin T., Demuth Howard B., Beale Mark. *Neural Network Design*. Beijing: PWS Publishing Company; 2002.