

11 40 244



UNIVERSITATEA "DUNĂREA DE JOS" GALAȚI
FACULTATEA DE MECANICĂ



DOMENIUL FUNDAMENTAL: ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT: INGINERIE MECANICĂ

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND EVOLUȚIA PARAMETRILOR STRATULUI SUPERFICIAL ÎN PROCESELE DE FRECARĂ ȘI UZURĂ ALE UNOR MATERIALE COMPOZITE CU MATRICE DE POLIBUTILENTEREFTALAT

CONDUCĂTOR DE DOCTORAT:

Prof. dr. ing. Ioan ȘTEFĂNESCU

DOCTORAND:

ing. Constantin GEORGESCU

Galăț - 2012



ROMÂNIA
UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS”
DIN GALAȚI



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
CERCETĂRII
TINERETULUI
ȘI SPORTULUI

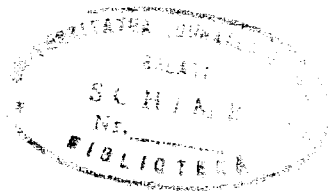
Către

C5048 / 21.05.2012

Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați vă face cunoscut că în data de 14.06.2012, ora 12.00, în sala D12 a Facultății de Mecanică, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată : “ STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND EVOLUȚIA PARAMETRIILOR STRATULUI SUPERFICIAL ÎN PROCESELE DE FRECARE ȘI UZURĂ ALE UNOR MATERIALE COMPOZITE CU MATRICE DE POLIBUTILENTEREFALAT”, elaborată de domnul/doamna ing. GEORGESCU CONSTANTIN, în vederea conferirii titlului științific de doctor în Domeniul de doctorat - Inginerie mecanică.

Comisia de doctorat are următoarea componență :

1. Președinte: Prof.univ.dr.ing. Cătălin PETEĂU
Decan – Facultatea de Mecanică
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați
2. Conducător de doctorat: Prof.univ.dr.ing. Ioan ȘTEFĂNESCU
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați
3. Referent oficial: Prof.univ.dr.ing. Andrei TUDOR
Universitatea POLITEHNICA din București
4. Referent oficial: Prof.univ.dr.ing. Cezar RACOCEA
Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași
5. Referent oficial: Prof.univ.dr.ing. Dan SĂVESCU
Universitatea TRANSILVANIA Brașov
6. Referent oficial: Prof.univ.dr.ing. Lorena DELEANU
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați



Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat și vi invităm să participați la susținerea publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm să le transmiteți în scris pe adresa Universității, str. Domnească nr. 47, 800008 - Galați, Fax - 0236 / 461353.

Prof.univ.dr.ing. L. CHITRESCU



SECRETAR DOCTORAT,
Ing. Luigă AXINTE

(Signature)

Str. Domnească nr.47, cod poștal 800008 - Galați, România, Tel.: +40 336. 130. 109, Fax: +40 236. 461. 353

Web: www.ugal.ro e-mail: rectorat@ugal.ro

CUPRINS

	Pag.
Capitolul 1 – Stadiul actual al cercetărilor privind comportarea tribologică a materialelor compozite polimerice	1
1.1. Materiale compozite – generalități	1
1.2. Polibutilentereftalatul (PBT)	2
1.3. Materiale de adaus în compozite polimerice	4
1.3.1. Generalități	4
1.3.2. PTFE ca material de adaus în compozite polimerice	5
1.3.3. Microsferele de sticlă	6
1.4. Compozite cu matrice de PBT	7
1.5. Mecanisme de uzură specifice materialelor polimerice	8
1.5.1. Tipuri de uzuri caracteristice tribosistemelor cu cel puțin un element polimeric	8
1.5.2. Transferul polimerilor	11
1.6. Calitatea suprafețelor în cuplele de frecare cu element polimeric	12
1.6.1. Evaluarea calității suprafeței prin profilometrie 3D	12
1.6.2. Studii recente asupra topografiei suprafețelor cuplelor de frecare metal – materiale polimerice	13
1.7. Corelație între emisia acustică și caracteristicile tribologice	14
1.7.1. Caracteristici ale emisie acustice	14
1.7.2. Studii recente privind emisia acustică pentru tribosisteme cu elemente din materiale plastice sau compozite polimerice	16
1.8. Direcții de cercetare	17
Capitolul 2 – Rezultate experimentale privind comportarea tribologică a materialelor compozite pe bază de PBT	19
2.1. Metodologie, materiale și echipamente utilizate	19
2.2. Rezultate experimentale privind coeficientul de frecare	22
2.2.1. Măsurarea coeficientului de frecare	22
2.2.2. Influența parametrilor de testare asupra coeficientului de frecare	23
2.2.3. Sinteza datelor experimentale cu privire la coeficientul de frecare	27
2.2.4. Concluzii privind coeficientul de frecare	31
2.3. Rezultate experimentale privind parametrii de uzură	32
2.3.1. Rezultate privind parametrii de uzură	32
2.3.2. Concluzii privind parametrii de uzură	37
2.4. Metodă proprie de evaluare a uzurii utilizând profilometria 3D	38
2.5. Corelație între emisia acustică și caracteristicile tribologice pentru materialele testate	43
2.5.1. Influența parametrilor de testare asupra emisie acustice	43

	Pag.
2.5.2. Influența materialelor de adaos asupra emisie acustice	44
2.5.3. Corelație între emisia acustică și proprietățile mecanice	45
2.5.4. Corelație între emisia acustică și volumul de material uzat	46
2.5.5. Corelație între emisia acustică și frecare	47
Capitolul 3 – Rezultate privind caracteristicile mecanice ale materialelor elaborate pe bază de PBT	50
3.1. Introducere	50
3.2. Rezultatele testelor la tracțiune pentru materialele studiate	51
3.3. Sinteza rezultatelor experimentale	52
Capitolul 4 – Modelarea cu elemente finite a contactului concentrat elasto-plastic	57
4.1. Modelul pentru sistemul bloc pe inel, cu frecare	57
4.2. Rezultate și discuții	58
4.3. Concluzii	62
Capitolul 5 – Cercetări experimentale privind evoluția calității suprafeței la tribomodele din materiale compozite pe bază de PBT	63
5.1. Metodologie caracteristică de măsurare a parametrilor texturii suprafeței	63
5.2. Analiză comparativă a valorilor parametrilor 2D și 3D pentru suprafețele neuzate și uzate ale compozitului GB10	64
5.3. Influența materialelor de adaos asupra parametrilor 3D ai rugozității suprafețelor din materiale compozite pe bază de PBT	69
5.4. Influența forței normale asupra parametrilor 3D ai rugozității suprafețelor blocurilor din PBT + 10% PTFE	77
5.5. Influența materialelor compozite pe bază de PBT testate asupra parametrilor 3D ai rugozității suprafețelor inelelor metalice	79
5.6. Concluzii	82
Capitolul 6 – Concluzii și contribuții personale	83
6.1. Concluzii finale	83
6.2. Contribuții personale	83
6.3. Perspective de continuare a cercetărilor	84
Bibliografie selectivă	85
Lista lucrărilor rezultate în urma cercetărilor efectuate pentru elaborarea tezei de doctorat	92

Capitolul 1

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND COMPORTAREA TRIBOLOGICĂ A MATERIALELOR COMPOZITE POLIMERICE

1.1. Materiale compozite – generalități

Materialele compozite sunt amestecuri de două sau mai multe componente, ale căror proprietăți se completează reciproc, rezultând un material cu proprietăți superioare sau diferite celor specifice fiecărui component în parte [124], [127], [172], [189], [235], [237], [304], [305]. Noțiunea de materiale compozite se referă la materialele care posedă următoarele proprietăți [80], [316]:

- sunt create artificial, prin combinarea voită și rațională a diferitelor componente;
- reprezintă o combinare a cel puțin două materiale deosebite din punct de vedere chimic, între care există o suprafață de separație distinctă - interfața;
- prezintă un set de proprietăți pe care nici un component luat separat nu le poate avea.

Avantajul major al materialelor compozite constă în posibilitatea modulării proprietăților și obținerea, în acest fel, a unei game foarte variate de materiale, a căror utilizare se poate extinde în aproape toate domeniile de activitate tehnică [209].

Compozitul cuprinde un material de bază, matricea, în care se află dispersat cel puțin un material complementar, sub formă de particule sau fibre, iar principalele proprietăți care se urmăresc să se obțină sub formă îmbunătățită sunt: rezistența la rupere, rezistența la uzură, densitatea, rezistența la temperaturi înalte, duritatea superficială, stabilitatea dimensională etc. sau combinații ale acestora [209], [265], [266], [393], [421].

Criteriile de clasificare ale compozitelor includ natura matricei, rolul și natura materialului sau materialelor de adaos [50], [59], [69], [80], [432].

O clasificare generală a materialelor compozite, într-un mod sintetic, are la bază utilizarea concomitentă a principalelor criterii prezentate anterior: particularitățile geometrice ale materialului complementar și modul de orientare al acestuia în matrice (fig. 1.1). Alegerea unui anumit material este dictată de setul de condiții concret cerute, între care predomină cele legate de preț și de gradul de complexitate a tehnologiei care poate fi aplicată pentru obținerea produsului finit.

Actualmente, materialele compozite cu matrice polimerică prezintă un interes științific și tehnic deosebit, fapt ce justifică dezvoltarea cercetărilor în acest domeniu [22], [124], [209], [235], [362], [421]. Acesta este și obiectivul acestei lucrări: un studiu experimental asupra comportării tribologice a materialelor polimerice pe bază de polibutilentereftalat.

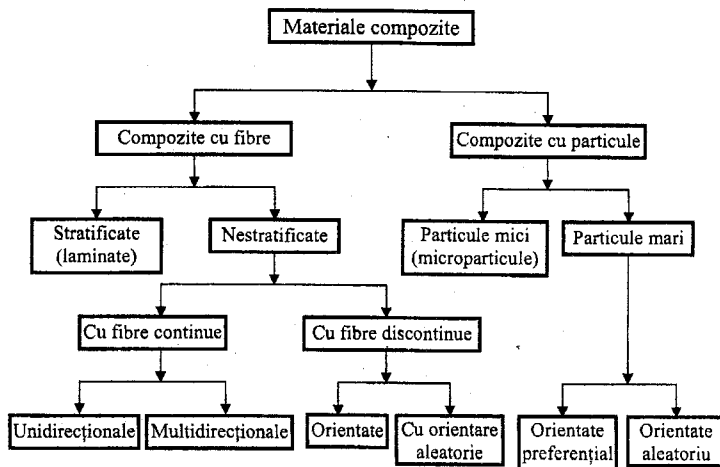


Fig. 1.1. Clasificarea compozitelor în funcție de configurația materialului complementar și de modul de repartizare a acestuia în matrice [59], [80], [316]

1.2. Polibutilentereftalatul (PBT)

Polibutilentereftalatul este adeseori abreviat cu PBT sau PBTP și este obținut prin polimerizare de condensare a dimetiltereftalatului și butan-diolului 1,4 în prezența titanatului de tetrabutil [50], [59], [80], [160], [235]. Polimerul este cunoscut și sub denumirea de politetrametiltereftalat (PTMT). Printre denumirile comerciale mai cunoscute sunt: Tenite PTMT (Eastman Kodak) [59], Valox (General Electric) [433], Celanex (Celanese) [430], Arnite PBTP (Akzo) [383], Ultradur (BASF) [431], Pocan (Bayer) [59], Crastin (DuPont) [395] + [402], RTP Series (RTP Company) [418].

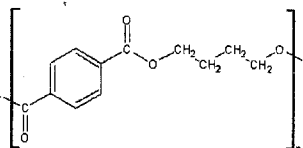


Fig. 1.2. Formula chimică a PBT-ului [7]

Datorită secvenței mai lungi de grupări de metilenă în unitatea de PBT (fig. 1.2), lanțurile lui moleculare sunt mai flexibile și mai puțin polare decât la polietilentereftalat (PET), ceea ce determină valori mai mici ale punctului de topire (~224°C) și ale temperaturii de tranziție vitroasă (22...43°C). Temperatura de tranziție vitroasă mai mică permite cristalizarea rapidă când materialul este în matrice, cicluri mai scurte de injectare și viteze mari de injectare [395] + [397].

În inginerie, PBT este utilizat pentru stabilitatea lui dimensională, mai ales în apă (dar nu ajunsă la punctul de fierbere) [401] și rezistenței la uleiuri pe bază de hidrocarburi, fără a genera fisuri. Are proprietăți mecanice bune (tabelul 1.1) și excelente proprietăți electrice, dar o temperatură joasă de deformare (54°C) la o sarcină de 1,8 MPa. Absorbția redusă de apă, mai puțin de 0,1% în 24 ore de imersare, este printre cele mai reduse pentru polimerii

termoplastici. Atât stabilitatea dimensională, cât și proprietățile electrice sunt menținute la umiditate ridicată. Lubricitatea rășinii stă la baza unei rezistențe la uzură deosebit de bună [59].

Tabulul 1.1. Proprietăți mecanice ale unor polimeri termoplastici [393], [402], [419]

Polimerul	Alungire la rupere, %	Alungire la curgere, %	E (încovoire) MPa	Duritate RM	Duritate Shore D	σ_r MPa	σ_c MPa	I_{rod}	
								RT	LT
POM	15-75	8-23	2800-3700	75-94	80-95	60-70	54-68	60-120	53-250
PBT	5-300	3,5-9	2000-4000	70-90	90-95	40-50		27-199	27-120
PET	30-70	3,8	2800-3500	50-100	85-95	45-70	50-57	140	
PEEK	30-150	5	3700-4000	55-100	85-95	90-150	90-110	80-94	
PAI	3-15		4000-7000	105-120	90-99	190-195	150	100-150	
PI	90	4-10	2480-4100	110		72-120	120	60-112	
PTFE	200-400		400-800		50-65	10	9-30	160-200	80
PPS	1-4	1-4	3800-4200	70-85	90-95	50-80		5-25	
PEI	59-60	6,8-7,2	3000-3400	100-110	95-99	90-100		50-60	
PA6	200-300	3,4-140	800-2000	30-80	80-95	50-90	50-90	50-160	15-20

RT - la temperatura camerei, LT - la temperatură joasă (în general -20°C)

PBT este un izolator electric mai bun decât PET. Are o bună stabilitate în hidrocarburi alifatiche, alcooli și esteri, dar este gonflat de esterii cu mase moleculare mici, de cetone și, parțial, de hidrocarburi halogenate [57], [59].

Astăzi, ca și în cazul PET, există un interes major pentru compozitele pe bază de PBT. Adaosurile de fibre de sticlă au efect benefic asupra modulului de elasticitate la încovoire, rezistenței la impact și a rezistenței la fluaj [416], [420], [422], [423], [432], [433].

Prin injecție se prelucrează aproape 90% din cantitatea produsă de PBT [59]. Ca și PET, PBT este predispus la hidroliză și, deci, granulele trebuie bine uscate înainte de a fi injectate [396], [430]. La temperaturi peste 270°C, PBT se descompune rapid, astfel că temperaturile de topire (înmuiere) la care se prelucrează sunt în intervalul 240...270°C. O temperatură de tranziție vitroasă, T_g , mică facilitează cristalizarea rapidă când piesele sunt răcite în matrițe (care sunt menținute, de obicei, la 50°C), ceea ce permite scurtarea ciclurilor de injecție. Se recomandă viteze mari de injecție, mai ales pentru compozitele cu fibre de sticlă, pentru a obține o bună calitate a suprafețelor pieselor injectate.

Utilizarea PBT este mai degrabă o consecință a setului echilibrat de proprietăți și nu datorită unei caracteristici cu valori extreme. Nu posedă reziliența PC, nici rezistența la abraziune a poliamidei alifatiche, nici rezistența la căldură a polisulfurilor, policetonelor (inclusiv PEEK) sau PPS și nici absorbția foarte redusă a PPO modificat. Ca membru al familiei poliesterilor, PBT va fi atacat de chimicalele obișnuite sau va fi gonflat, în special la temperaturi peste T_g . De aici interesul pentru aplicații tribologice în regim uscat. În ciuda acestor dezavantaje, PBT are un set echilibrat de proprietăți (rar oferit de alți polimeri), mai ales sub formă de compozite cu adaosuri de ranforsare sau amestecuri care îl fac greu inflamabil.

PBT tinde să înlocuiască poliamidele pentru piese de precizie, datorită stabilității dimensionale mai bune, mai ales în apă și în uleiuri minerale, fără fisurare sub sarcină. Rigiditatea compozitelor cu fibre este și ea cerută în multe aplicații [275], [416], [432].

Există un interes deosebit al cercetătorilor și utilizatorilor pentru amestecuri de alți polimeri cu PBT, printre care PMMA, PE, PTFE (amestecul PBT + PTFE fiind inclus în acest studiu [48], [142], [144]), elastomeri polieter-esterici, PC, PFO, PEO. Amestecuri de PBT cu policarbonați sunt utilizate pentru piese de protecție la șoc la autovehicule.

Figura 1.3 prezintă ponderea aplicațiilor pe bază de PBT pe piața europeană [59].

Ponderea aplicațiilor tribologice pentru fiecare grupă este greu de estimat, dar se poate presupune că este de cel puțin 20% din total. Aplicațiile tipice ale PBT includ: carcase de pompe, elice, cuzineți de lagăre, elemente de caroserie și de interior pentru autovehicule, piese pentru electronică și electrotehnică, cum ar fi întrerupătoare și carcase de siguranță [69], angrenaje în aparate de măsură și birotică [422], [431], [432]. În electrotehnică și electronică, din PBT se fac suporturi de bobine, întrerupătoare miniaturale, cadre de display, cutii de distribuție în telefonie etc. În sectorul autovehiculelor, materialele pe bază de PBT sunt utilizate pentru suporturi de scrumiere, pedale de picior, mânere de uși și componente ale centurilor de siguranță, iar la exteriorul mașinii, suporturi de ștergătoare și carcase de oglinzi.

Aplicațiile de birotică includ taste, ghidaje, suporturi de conectori și acoperiri pentru cabluri optice, angrenaje mici etc. PBT are aplicații în produse de gospodărie nu numai datorită temperaturii ridicate de deformare, a rigidității, a proprietăților dielectrice și a stabilității dimensionale, ci și pentru rezistența lui la lichide și chimicale tipic folosite în casă (detergenți, uleiuri și grăsimi, sucuri de fructe și legume, băuturi, alimente și mirodenii).

Piese confecționate din materiale pe bază de PBT sunt: mânere de aragaz, piese pentru cafetiere, carcase, perii la uscătoare de păr etc.

Alte aplicații ar fi [399], [419], [422]: bobine, pistoale pentru adezivi la cald, carcase de pompe. De obicei se folosesc compozite cu fibre și microsferă de sticlă, talc, mică, dar și cu agenți de legătură [403], [430], [432].

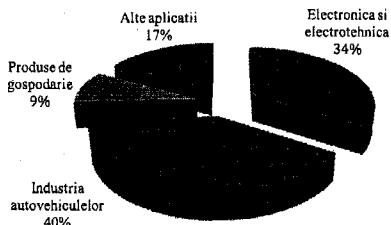


Fig. 1.3. Domenii de aplicații pentru materiale pe bază de PBT (adaptat după [59])

1.3. Materiale de adaos în compozite polimerice

1.3.1. Generalități

În 2009, Dasari [88], după o trecere în revistă sistematică și aprofundată a compozitelor polimerice și a răspunsului lor la frecare și uzură, a concluzionat:

- nu s-a validat presupunerea că nano-adașurile îmbunătățesc întotdeauna proprietățile tribologice;
- proprietățile de material (modulul de elasticitate, duritatea, reziliența), viteza de uzură sau adâncimea la zgâriere nu sunt singurii indicatori pentru a compara sau ierarhiza materiale pentru aplicații tribologice.

Unele aspecte ale uzurii și ale răspunsului perechii de materiale la alunecare necesită o investigare atentă pentru a determina parametrii care controlează deteriorarea suprafețelor. Studiile de cercetare care implică polimerii sunt mai puține comparativ cu cele realizate pentru alte materiale [172], [393], [421] și acest lucru se datorează, poate, caracterului lor văscos-elastic [57], [132], [209], care complică prelucrarea și analiza rezultatelor. În general, adăugarea de materiale cu rol de ranforsare și/sau de lubrifiere îmbunătățește comportarea tribologică. Adaosurile cu rol lubrifiant acționează prin scăderea energiei superficiale, dar ele duc la legături slabe în material, afectând rezistența materialelor. Adaosurile de ranforsare cresc rezistența compozitelor polimerice, dar pot modifica drastic abrazivitatea pe suprafața conjugată. Astfel, se poate mări coeficientul de frecare, ar putea crește rugozitatea suprafeței conjugate, nu se mai formează un film de transfer uniform și protectiv și se generează un regim de alunecare caracterizat prin uzură mare, cu al treilea corp (Godet, citat în [28]). Materialele adăugate în polimeri nu îmbunătățesc toate proprietățile materialului de bază. De exemplu, în anumite condiții, prezența fibrelor poate duce la înrăutățirea uzurii.

Evans și Lancaster [117] afirmă că introducerea de fibre în polimeri are, în general, efecte benefice asupra uzurii și rareori o înrăutățește. Se observă și o îmbunătățire a altor parametri: scade deformarea sub sarcină fără a afecta conformabilitatea, uneori și coeficientul de frecare este mai mic și mai stabil [329], unele materiale de adaos facilitează evacuarea mai rapidă a căldurii etc. Interesul mare și cererea de compozite polimerice din ultimii ani a evidențiat limitele în optimizarea proprietăților lor, deoarece atingerea lor implică niște compromisuri [88], [124], [265].

1.3.2. PTFE ca material de adaos în compozite polimerice

Produsele din PTFE își mențin anumite proprietăți la valorile inițiale, indiferent de procedeul de prelucrare [59]. Proprietățile chimice care rămân neschimbate în domeniul tehnic la utilizări de durată, sunt: stabilitatea în medii chimice agresive, insolubilitatea, stabilitatea la intemperii și anti-aderența. Proprietățile fizice care rămân, practic, neinfluențate, sunt: flexibilitatea la temperaturi scăzute, stabilitatea termică, constanta dielectrică scăzută, rezistență înaltă la arc electric, rezistență electrică mare la suprafață, rezistență electrică specifică mare [384], [421].

Din punct de vedere tribologic, toate experimentele au subliniat un coeficient de frecare scăzut [86], [104], [117], [340], [359].

În regim uscat, intensitatea uzurii pentru PTFE este mare [53], [117], dar adăugarea de fibre sau pulberi reduce uzura cu un factor de 100 sau mai mult [104], [326], [362]. Din cauza slabei rezistențe la uzură, se preferă pentru PTFE rolul de material de adaos (ca lubrifiant solid) [275], decât utilizarea lui ca matrice [326], așa cum se va avea în vedere și la stabilirea rețetelor pentru materialele pe bază de PBT care fac obiectul acestui studiu de cercetare exploratorie.

Burriss și Sawyer au studiat amestecul PEEK + PTFE [65]. PEEK are rezistență la uzură și temperatură de lucru mai ridicate față de alți polimeri, coeficient de frecare $\mu \geq 0,4$ (regim uscat) și conductivitate termică redusă. PTFE are însă o viteză de uzură mare, deși coeficientul de frecare este printre cele mai mici. Adaosul de PTFE într-un polimer mai dur, cum este PEEK, se poate modela ca în figura 1.4.

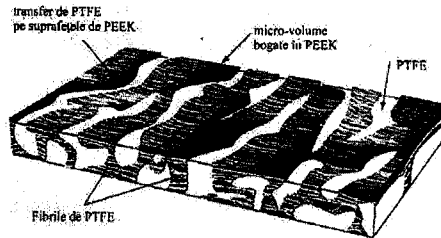


Fig. 1.4. Modelul structural propus de [65]

Deși rețetele de amestecuri polimerice cu PTFE recomandă 5...20% PTFE [275], [383], [418], [430], [431], [433], pentru experimentele făcute de Burriss și Sawyer s-a obținut o intensitate de uzură mică pentru amestecul polimeric 30% PEEK + 70% PTFE. Briscoe și Sinha [53], [55], [295] au făcut epruvete din PTFE cu adaos de PEEK, de la 0% la 100%. Pulberile au fost amestecate folosind un mixer, apoi comprimate și sinterizate. Rezultatele au arătat o creștere monotonă a vitezei de uzură cu creșterea conținutului de PTFE și o descreștere monotonă a coeficientului de frecare. Diferențele dintre rezultatele lui Bijwe și Briscoe sunt legate de materiale, prelucrarea lor și microstructură și chiar condiții de testare.

Ca și frecarea, rezistența la uzură eșuează în a urma orice regulă a amestecurilor. De aceea testele de laborator și apoi cele pe piese reale sunt o necesitate în tribologie [53]. Componentul cu ~20% (vol) PEEK a avut o intensitate a uzurii de 26 de ori mai mică decât a PEEK și de 900 de ori mai mică decât PTFE.

1.3.3. Microsferele de sticlă

Sticla tip E este o sursă abundentă pentru microsfere de sticlă (MSS), dar nu este recomandată în anumite tipuri de materiale plastice din cauza rezistenței scăzute la acizi și medii alcaline. Sticla de tip C este pentru aplicații inginerești cu medii agresive, în special acizi. Formulele pentru sticla de tip C sunt numeroase. Principalii factori care asigură rezistența chimică, dar și rezistența la uzură sunt: cel puțin 60% SiO_2 , oxizi de Li și Na, oxizi de Yn și de Ca și oxizi ai pământurilor rare, cu mici cantități de Al_2O_3 , B_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO , și SnO_2 [209]. Adăugarea acestui tip de ranforsant influențează proprietățile tehnologice [365], proprietățile mecanice [202] și pe cele tribologice [98].

Meddad și Fisa au studiat și au propus un model pentru ruperea compozitelor cu microsfere de sticlă [234]. Deși tratarea MSS nu a adus modificări semnificative asupra proprietăților mecanice ale compozitului, aspectul în ruptură diferă (fig. 1.5). Klaas [191] a realizat în anul 2005 un studiu interesant asupra influenței diferitelor adaosuri de sticlă (fibre scurte, microsfere și "cioburi" sau fulgi) în PTFE (fig. 1.6). Testele s-au efectuat pe un tribometru știft pe disc, pentru o lungime de alunecare de maxim 5 km, cu $v = 0,2$ m/s. Aria de contact a știftului cu discul de oțel ($R_a = 0,2 \mu\text{m}$) a fost de 10 mm x 10 mm. Adaosul de MSS în PTFE a dat rezultate bune la uzură, fiind depășite doar de compozitele cu fibre și lubrifiant solid (MoS_2).

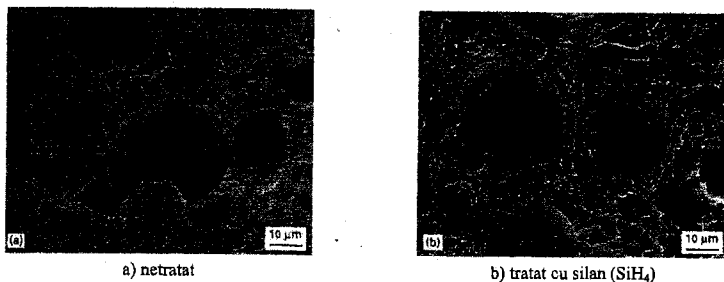


Fig. 1.5. Aspecte ale epruvetelor din PS + 10% MSS, rupte la tracțiune [234]

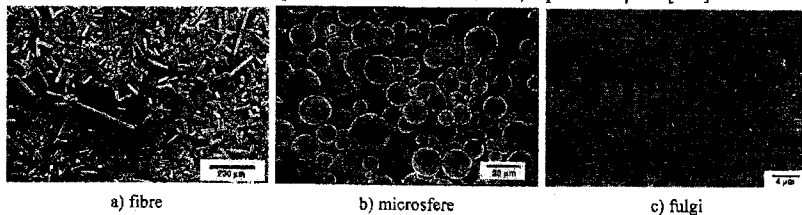


Fig. 1.6. Forme de particule de sticlă, adăugate în matrice de PTFE [191]

1.4. Compozite cu matrice de PBT

Mărci pe bază de PBT sunt obținute atât prin adăugare de materiale mult diferite (ranforsări cu fibre micro sau nano [136], adaosuri de pulberi metalice și/sau ceramice, minerale [108], [109]), rezultatul putând fi inclus în clasa compozitelor, cât și prin amestecare cu alți polimeri (politetrafluoretilena (PTFE) [142], [418], policarbonat (PC) [350], polietilena (PE), SAN, rășină epoxidică), cu adaosuri pentru creșterea rezistenței la foc – obținându-se amestecurile polimerice [80], ambele variante direcționând una sau un set de proprietăți ale matricei de PBT.

Materialele de adaos în PBT sunt diverse, aproape toate tipurile întâlnite în compozitele polimerice (fibre lungi, fibre scurte, particule, amestecuri ale acestora), atât la scară micro [399], [418], [423], [430], [432], [433], cât și nano [189], [420]. În aplicații tribologice, natura fibrelor adăugate este diversă: de sticlă, de carbon, aramidice, titanaj [395], [397] + [402], [418], [420], [432].

Deși în literatura de specialitate s-a evidențiat influența materialelor de adaos asupra unor caracteristici mecanice (limita de tracțiune și modulul de elasticitate) pentru PBT [418] și materiale pe bază de PBT (compozite cu nano-argilă), aceste proprietăți nu reflectă și comportarea tribologică a materialelor enumerate. De aceea testarea materialelor compozite polimerice este foarte importantă și, deși rezultatele nu se pot extrapola de la testele făcute pe tribotestere de laborator la cupla reală de frecare, aceste studii sunt utile pentru ierarhizarea materialelor în funcție de unul sau un set de parametri tribologici de interes pentru utilizator, [85], [88], [102], [124].

1.5. Mecanisme de uzură specifice materialelor polimerice

1.5.1. Tipuri de uzuri caracteristice tribosistemelor cu cel puțin un element polimeric

Uzura adezivă implică formarea și ruperea micro-joncțiunilor din cauza mișcării relative dintre suprafețe. Deci, formarea și ruperea micro-joncțiunilor controlează componenta de adeziune a frecării [88]. Micro-joncțiunile sunt formate prin sudare (în cazul materialelor metalice), iar la polimeri, din cauza interacțiunilor fizice sau/și chimice (inclusiv prin legături Van der Waals și legături de hidrogen), pe baza încălzirii suprafeței

care poate fi suficient de mare pentru a topi sau înmuia polimerul în zona suprafeței de contact (fig. 1.7). La continuarea mișcării, dacă legătura între asperitățile care aderă este mai mare decât rezistența asperităților, se detașează fragmente de pe suprafață, rezultând particule de uzură. Se generează o peliculă sau „insulițe” de polimer pe contrapiesa dură, influențând puternic frecarea și uzura [127], [176]. Forfecarea micro-joncțiunilor la aplicarea forței tangențiale este o componentă a frecării. În general, formarea și ruperea micro-joncțiunilor sunt controlate de natura suprafețelor, de chimia lor, de starea de tensiuni indusă în straturile superficiale și chiar de calitatea suprafeței [346].

Uzura polimerilor este influențată de mulți factori, cum ar fi rugozitatea suprafețelor, cinematica contactului, natura materialelor în contact, proprietățile lor chimice, fizice și mecanice, mediul de lucru etc. În general, în funcție de structură și de organizarea lanțurilor moleculare, polimerii au temperaturi de tranziție joase, comparativ cu metalele și conductivitate termică mai mică. Deci, energia consumată în procesele tribologice și transformată în procent mare în căldură [86], [304], [305], poate duce la înmuierea, topirea, oxidarea și chiar piroliza polimerului, cel puțin în stratul superficial, iar particulele de uzură generate, în funcție de mărime și formă [304], [305], afectează performanțele sistemului.

Procesele de uzură caracteristice polimerilor pot fi grupate, în principal, în două categorii [244]: procese coezive și procese interfaciale. În procesele coezive, lucrul mecanic de frecare este disipat în volumele adiacente contactului, relativ mari, prin interacțiunea forțelor de suprafață, rezultând tensiuni de tracțiune sau chiar blocarea contactului. Uzura coezivă este în special controlată de proprietățile mecanice ale materialelor în contact: rezistență la abraziune, la oboseală (inclusiv frettingul). În contrast, procesele interfaciale implică disiparea energiei de frecare în regiuni mai mici și cu densități energetice mai mari, ceea ce duce la creșterea temperaturii locale. Trebuie luate în considerare chimia suprafețelor [53], [176] și forțele rezultate de aici, altele decât proprietățile mecanice ale materialelor în contact, pentru a determina deteriorarea prin uzură [393], [420]. În această grupă intră uzura prin transfer și uzura chimică.

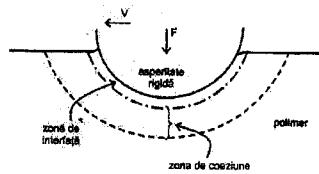


Fig. 1.7. Reprezentarea schematică a contactului cu alunecare dintre o asperitate rigidă și un polimer [88]

Teoria uzurii adezive a lui Archard a fost acceptată, sub forma volumului de material uzat [mm³]:

$$V = \frac{K \cdot F_n \cdot L}{H} \quad (1.1)$$

în care K este un coeficient de uzură [mm³/N·m], F_n – forța normală [N], L – distanța de alunecare [m], H – duritatea materialului care se uzează mai repede.

Uzura abrazivă este o componentă importantă în uzura polimerilor și a materialelor polimerice. Conceptual, poate fi sub două forme distincte:

- uzura abrazivă generată de două corpuri;
- uzura abrazivă cu trei corpuri [304], [305].

Prima variantă apare când asperitățile corpului dur „brăzdează” și provoacă deformarea plastică sau ruperea materialului mai moale. A doua apare când particule dure și/sau particulele de uzură sunt (re)introduse sau rămân în contactul de alunecare. Formarea particulelor de uzură prin uzura abrazivă se face prin mecanisme de micro-brăzdară, micro-așchiere și micro-fisurare, induse de asperitățile corpului mai dur (fig. 1.8) [88].



a) uzura adezivă

b) uzură abrazivă

c) uzură de oboseală

Fig. 1.8. Aspecte tipice ale suprafețelor polimerice după alunecare în regim uscat [88]

Rabinowich ([260] și citat în [244], [295], [333]) a presupus că asperitățile sunt conice și a formulat pierderea volumică de material astfel:

$$V = \frac{F_n \cdot L \cdot \tan \theta}{\pi \cdot H} \quad (1.2)$$

în care θ este unghiul la vârful conului asperității, $\overline{\tan \theta}$ este media valorilor $\tan \theta$ pentru suprafața dură și H este duritatea materialului mai moale (de obicei în unități Vickers).

Testele de laborator sunt utile dacă se pot impune operații reproductibile pentru contactul real. Modelele ajută la furnizarea unor direcții de interpretare. Prețul care trebuie plătit este o „interacțiune” între experimente, modele și ingineria suprafețelor, pentru a dezvolta materiale care să satisfacă cerințele tribologice.

În 2005, Klaas, Marcus și Kellock prezintă un studiu tribologic pentru PTFE cu trei tipuri diferite de ranforsanți de sticlă: fibre, microsferă și fulgi [191]. Microsferele au fost utilizate în variantele: pline sau goale la interior. Testele au fost realizate pe un tribotester cu mișcare alternativă, pentru 5000 m, la viteza de alunecare medie de 0,2 m/s. Unul din compozitele cu fibre de sticlă (FS) a avut și 2% MoS₂. Pierderea de material a fost minimă pentru acest compozit, urmat de cele cu microsferă și fibre de sticlă, iar calitatea suprafeței urmelor de uzură a fost mult mai bună pentru PTFE + MSS și PTFE + FS + MoS₂ (Ra = 0,08...0,16 μm). Coeficientul de frecare a fost puțin mai ridicat ($\mu = 0,18...0,20$) pentru

compozitul cu MSS comparativ cu cel cu fibre și MoS_2 ($\mu = 0,16 \dots 0,19$). Valorile presiunilor medii de testare au fost de 2,6 MPa și 6,4 MPa. Pelicula de transfer a fost mai groasă pentru PTFE + MSS, comparativ cu PTFE + fibre de sticlă.

Uzura de delaminare, (fig. 1.9) [88], este des considerată o uzură provocată de oboseală superficială și are loc în trei etape:

1. formarea porilor sau desprinderilor lângă suprafață;
2. dezvoltarea lor ca fisuri sub suprafață;
3. detașarea de particule fine (subțiri), când fisura atinge o lungime critică și se rupe lângă suprafață.

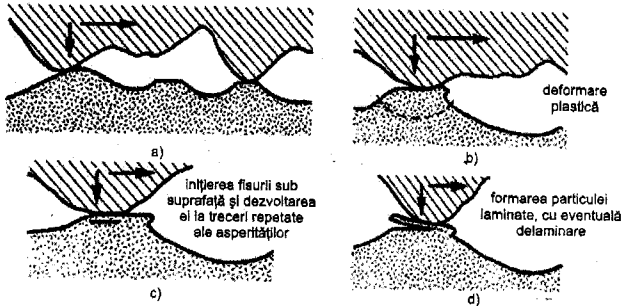


Fig. 1.9. Uzura de delaminare, specifică polimerilor și compozitelor lor [88]

O reprezentare schematică a procesului de delaminare (lăminare + detașare) este dată în figura 1.9.d. Grosimea unei micro-plachete este controlată de locul sub suprafața unde se inițiază și se dezvoltă fisura, la rândul ei determinată de sarcinile tangențiale și normale.

Uzura de oboseală este rezultatul oboselii superficiale, datorat tensionării și detensionării repetate a contactelor, ducând în general la fisurare și formare de particule de uzură. Caracteristica acestui proces este acumularea ireversibilă a modificărilor în stratul superficial care inițiază și apoi propagă fisurile (fig. 1.8.c) [88]. Uzura de oboseală apare în combinație cu cea de delaminare. Este greu de diferențiat aceste mecanisme, în special pentru polimeri.

Uzura de transfer apare în special în cuplele de frecare polimer-metal, polimer-ceramică, dar și polimer-polimer, la alunecare și este responsabilă de tranziția graduală la uzura stabilizată (viteză de uzură mică și constantă) [304], [305]. La contactele polimer-metal și polimer-ceramică transferul este de pe polimer pe materialul mai dur, la contactul polimer-polimer transferul nu are o direcție preferențială. Transferul apare din cauza adeziunii dintre două materiale, pentru că, în contact, sub suprafețe, apar forfecări.

Alte forme de uzură specifice cuplei de frecare cu polimeri sau compozite polimerice sunt: frettingul, eroziunea, atacul chimic etc. Uzura cu caracter chimic apare dacă o reacție are loc numai la interfața de contact sau în vecinătate, ca de exemplu oxidarea polimerilor, hidroliza și dizolvarea lor. Aceste reacții pot cauza ruperea lanțurilor moleculare, scăderea masei moleculare [237], apariția de produse nefavorabile pentru funcționarea mușcării.

Materialele de adaos în polimeri modifică mecanismele de producere a ruperii și detașare a polimerului, în figura 1.10 fiind dată o sinteză a proceselor tribologice în cuple de frecare cu cel puțin un element polimeric.

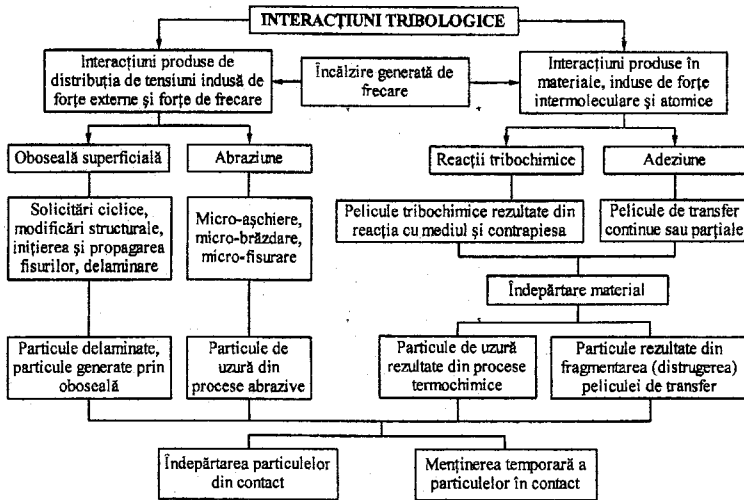


Fig. 1.10. Interacțiuni de natură tribologică care generează particule de uzură (adaptat după [86], [295])

1.5.2. Transferul polimerilor

Modelele calitative de frecare pentru polimeri includ procese de transfer, particularizate în funcție de observațiile testelor de alunecare. Printre cele mai cunoscute astăzi sunt cele explicate de Stachowiack [304], [305] (fig. 1.11). PTFE oferă un exemplu "clasic" de transfer [86], [102], [104]. Cauza aderenței se consideră a fi de natură mecanică: din cauza lipsei grupărilor laterale, a formei aproape cilindrice a moleculei de PTFE, aceste molecule se mișcă mult mai ușor unele față de altele atunci când se aplică o forță tangențială. Cum PTFE este format din structuri alternante de micro-zone cristaline și amorse, cu rezistență mecanică mai mică, această organizare favorizează desprinderea discretă a micro-plachetelor. Rezultatul este un coeficient de frecare foarte mic, dar o pierdere de material substanțială (fig. 1.11.a). Spre deosebire de alți polimeri, mecanismul de aderență și transfer a PTFE implică mai mult componente mecanice, și foarte rar, componente de natură chimică. Mărimea micro-insulelor de polimer este de ordinul micronilor, depinzând de condițiile de mișcare, de sarcină, viteză și temperatura dezvoltată în contact, de calitatea suprafeței mai dure etc. Acest tip de transfer nu este benefic de cele mai multe ori nici pentru coeficientul de frecare (determină oscilații mari ale lui), nici pentru uzură, materialele cu o astfel de comportare nefiind dorite pentru aplicații tip lagăr.

Multe studii au validat aceste modele cantitative [101], [304], justificând coeficientul de frecare redus prin formarea unei pelicule de transfer de polimer pe contrapiesă. Dar pelicula de transfer poate avea o influență mult diferită asupra uzurii piesei polimerice. De exemplu, în cazul PTFE, deși pelicula de transfer este aproape continuă, ea se regenerează cu viteză relativ mare și este ușor eliminată din contact, ceea ce face ca parametrii de uzură să nu fie dezirabili comparativ cu alți polimeri la care transferul nu are o dinamică atât de pronunțată și pelicula nu este ușor de fragmentat și de eliminat din contact.

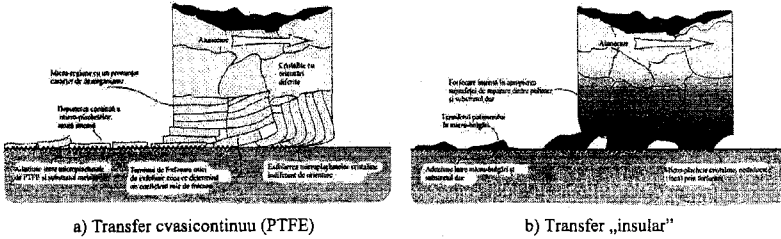


Fig. 1.11. Modele de transfer ale polimerilor pe suprafața conjugată [305]

În lucrări de referință în tribologia polimerilor și compozitelor lor [295], [304], [305], nu se menționează PBT, dar rezultatele obținute în [3], [189], [140] + [144], [146], chiar și cele din această lucrare, îl vor aduce în atenția utilizatorilor.

1.6. Calitatea suprafețelor în cuplele de frecare cu element polimeric

1.6.1. Evaluarea calității suprafeței prin profilometrie 3D

Premisa este că natura este în mod intrinsec 3D și că textura suprafeței ar trebui definită întâi în 3D și apoi pe baza profilometriei 2D. Este un concept nou, opus celui anterior, când parametrii de suprafață au fost rezultatul extrapolării parametrilor 2D [405] + [407], [409], [412], [413], [428].

Numărul de măsurători necesare caracterizării texturii depinde de tipul parametrilor și de nivelul de încredere. McCormick prezintă varianta din figura 1.12, dar alte studii propun, în general, câteva măsurători 3D și un număr mai mare de măsurători 2D.

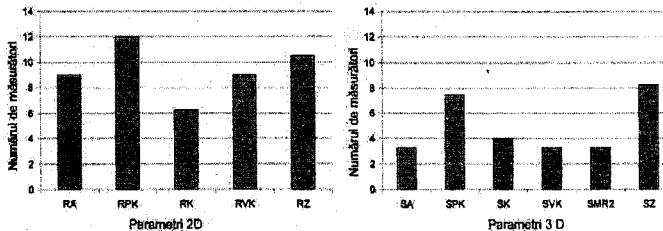


Fig. 1.12. Numărul de măsurători necesare pentru a menține valoarea parametrului într-un interval cu $\pm 10\%$ folosind o distribuție T, cu un nivel de încredere de 95%

1.6.2. Studii recente asupra topografiei suprafețelor cuplelor de frecare metal - material polimeric

Uzura adezivă a polimerului într-un tribosistem polimer – metal este puternic influențată de rugozitatea suprafeței metalice. S-a demonstrat că există un interval optim al valorii parametrilor de rugozitate pentru ca polimerul să aibă o comportare bună la uzură [304]. În figura 1.13 este prezentată: sus - o suprafață metalică prea netedă, care nu permite ancorarea mecanică a particulelor de polimer pentru a forma o peliculă de transfer cu rolul de a reduce frecarea și uzura, jos - o suprafață metalică cu o topografie optimă, permițând un transfer favorabil reducerii frecării și uzurii.

Suprafața conjugată influențează uzura oricărui polimer prin duritatea, rugozitatea și "energia superficială". Ultima mărime nu este clar definită și este greu de măsurat [244], [304], implicând procese mecanice și de natură chimică.

O rugozitate prea mare mărește excesiv ponderea proceselor de abraziune. Dacă asperitățile suprafeței dure sunt înalte, micro-volumul de polimer uzat și deformat este mai mare. Procesul scade totuși în intensitate pentru că se dezvoltă procesul de transfer care modifică topografia suprafeței dure în sensul "umplerii" văilor și "învelirii" asperităților cu rol de micro-scule așchietoare.

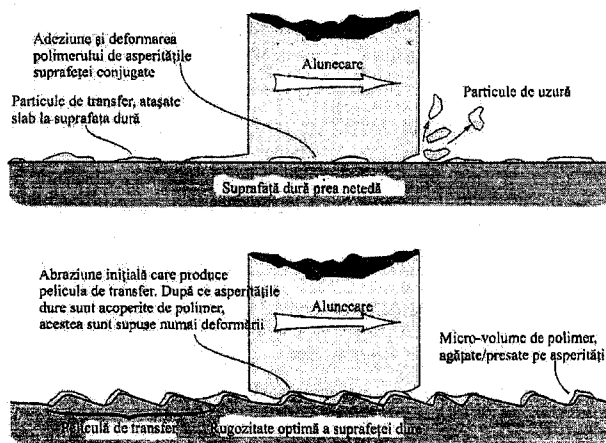


Fig. 1.13. Influența rugozității asupra uzurii [304]

În majoritatea soluțiilor pentru lagăre și etanșări cu regim uscat, un material polimeric auto-lubrifiant alunecă pe o suprafață dură, deoarece această combinație s-a dovedit mai eficace din punct de vedere al frecării și uzurii comparativ cu alunecarea materialului polimeric pe el însuși [304], [305]. Componentele de adeziune și de abraziune ale proceselor de frecare și uzură se influențează sinergic. De exemplu, extinderea joncțiunilor depinde de deformația elasto-plastică a asperităților [45], [81], [107], [132], [153] și nu pot fi separate. La

contactul polimer-metal, deteriorarea prin deformare elasto-plastică a polimerului este mai mare, în timp ce pentru suprafețe dure foarte netede, crește componenta de adeziune [275]. Pelicula de transfer generată pe suprafața dură, caracteristică cuplei de frecare polimer-metal, alterează și ea textura suprafeței, în funcție de natura polimerului și de condițiile de lucru [127], [304], [305].

S-au publicat numeroase studii referitoare la comportarea tribologică a materialelor polimerice [53], [127], [131], dar puține dintre acestea s-au ocupat de influența rugozității asupra caracteristicilor tribologice și mai puține au relatat modul în care funcționarea cuplei afectează suprafețele de contact [99], [100]. Încă din 1970, Pooley și Tabor (citați în [304]) au arătat că pentru PTFE, valoarea coeficientului de frecare este doar foarte puțin afectată de calitatea suprafețelor, atât timp cât se folosesc cele netede, dar pe suprafețe rugoase, și uzura și frecarea sunt intensificate. Până astăzi, termenii de „neted” și „ruginos” au fost folosiți mai mult în sens calitativ și nu s-au detaliat în valori recomandabile pentru aplicații.

Studiile experimentale au dovedit că modificarea rugozității poate afecta semnificativ frecarea și uzura. De aceea, autorul acestei lucrări consideră necesară evaluarea calității suprafeței și după efectuarea testelor, întrucât multe din cuplele cu elemente polimerice funcționează cu porniri și opriri, sau în regim intermitent de lucru.

În cuplele de frecare polimer - metal, uzura este influențată atât de parametrii de amplitudine ai rugozității, dar și de funcția de distribuție a înălțimii asperităților. Din documentația studiată, calitatea suprafețelor este evaluată de cele mai multe ori prin parametri ca Sa și Sq. Pentru studii tribologice și mai ales a suprafețelor uzate, este mult mai probabil de găsit și valorificat corelații între parametrii ce redau valori maxime ale topografiei (Sz, Sv, Sp), parametri funcționali și cei hibridi, și parametri tribologici (coeficient de frecare, parametri de uzură, durabilitatea contactului).

1.7. Corelație între emisia acustică și caracteristicile tribologice

1.7.1. Caracteristici ale emisiilor acustice

În frecarea solidelor apar diverse procese fizice, chimice, termice și mecanice în zona micro-joncțiunilor de contact. Unele sunt similare proceselor care apar la deformarea și deteriorarea materialelor, altele sunt specifice frecării. Deci, semnalele acustice în frecare rezultă, în principal, din aceleași fenomene: încărcarea mecanică și deteriorarea materialelor, dar au caracteristici particulare perechii de materiale în contact și regimului de lucru.

Caracteristica distinctivă a EA în frecare este prezența surselor suplimentare în comparație cu deformarea și ruperea. Acestea rezultă din procesele cu dezvoltare rapidă care apar în frecare: interacțiunea elastică a asperităților (coliziunea asperităților etc.), procese chimice, inclusiv coroziunea, care însoțesc frecarea (tribocoroziunea) [304], [305], [333] și formarea și ruperea joncțiunilor. Experimental este dificil să se asigure condiții favorabile unuia dintre procese și, deci, este imposibil de separat și de studiat separat sursele de EA. De

aici raritatea studiilor despre emisia acustică, iar pentru contactul polimer – metal sunt și mai puține [25], [27].

Emisia acustică în frecare este atribuită schimbărilor în starea de tensiuni și deformații ale joncțiunilor de contact și apariției particulelor de uzură, adică deteriorării stratului superficial (Fig. 1.14).

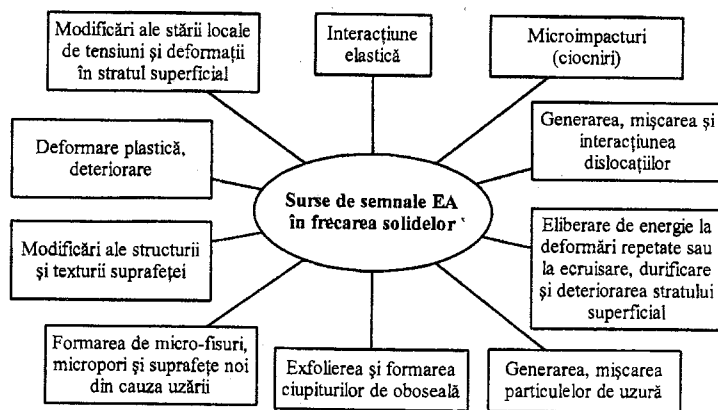


Fig. 1.14. Surse de emisie acustică în frecarea solidelor (adaptat după [18])

Caracteristicile EA sunt sensibile la tipul de uzură. Valori mari ale intensității EA sunt tipice pentru uzura abrazivă, în comparație cu adeziunea și uzura de oboseală. Când se studiază forma semnalelor EA în frecarea stabilizată, se constată că materialele deteriorate prin adeziune și oboseală produc un semnal continuu cu o amplitudine mică în timp ce materialele deteriorate prin adeziune cu rupere au un semnal de tip exploziv. Când uzura abrazivă devine dominantă, amplitudinea semnalelor crește de aproximativ 2 ... 3 ori.

Semnalele EA în solide rezultă din diverse evenimente aleatoare, deci și EA trebuie considerată un proces stohastic și analiza lui se va baza pe teoria statisticii matematice, care să fină seama de transformarea semnalului în sistemul de măsurare. Se recomandă [18] păstrarea aceleiași sistem de măsurare, pentru a nu distorsiona informația.

Studii recente [18], [25], [27], [221], au arătat că analiza emisie acustice permite identificarea în zona de frecare a următoarelor procese: rodaj (acomodare), distrugerea peliculelor de lubrifiant și a acoperirilor și uzura. Pe baza acestor informații se pot dezvolta metode și instrumente pentru inspecția tribosistemelor.

Pe baza literaturii studiate [18], **factorii care influențează aspectul emisie acustice** pot fi grupați în două categorii (tabelul 1.2).

Tabelul 1.2. Factori care influențează amplitudinea impulsurilor EA (după [18])

Factori care cresc amplitudinea	Factori care micșorează amplitudinea
<ul style="list-style-type: none"> • suprafață rugoasă • duritate mare • anizotropia texturii suprafeței • neomogenitatea proprietăților în straturile superficiale • structură grosieră • absența texturării • reziliență joasă • defecte din straturile superficiale • viteză mare de alunecare • sarcină mare • condiții nestaționare de frecare • uzură abrazivă • deteriorare prin micro-așchiere • frecare uscată • frecare limită cu lubrifianț lichid • prezența agenților tensio-activi • mediu corosiv 	<ul style="list-style-type: none"> • suprafață netedă • duritate mică • izotropia texturii suprafeței • omogenitatea proprietăților în straturile superficiale • structură fină • prezența texturării • reziliență ridicată • absența defectelor în straturile superficiale • viteză mică de alunecare • sarcină mică • condiții staționare de frecare • uzură adezivă • deteriorare prin deformare plastică • frecare în prezența unui lubrifianț • frecare limită cu lubrifianț solid • absența agenților tensio-activi • mediu puțin agresiv chimic

1.7.2. Studii recente privind emisia acustică pentru tribosisteme cu elemente din materiale plastice sau compozite polimerice

Relația între uzură și semnalul EA a fost investigată de [18], [25], [27]. Grafice ale intensității specifice de uzură k_0 și tensiunea semnalului EA integrată pe perioada de timp de testare, numită int EA , arată o împrăștiere mare cu distribuție aleatoare. Acest lucru se datorează sensibilității mari, observate pentru k_0 , față de parametrii de testare.

Totuși, există o corelare rezonabilă dintre EA și volumul de material uzat. Figura 1.15 prezintă rezultate obținute pentru toți parametrii de testare și arată că int EA crește cu creșterea volumului de uzură al pinului:

$$\text{int EA} = \int EAdt = K_{EA} \cdot w \tag{1.3}$$

în care w – volumul de material uzat și K_{EA} – o constantă de proporționalitate.

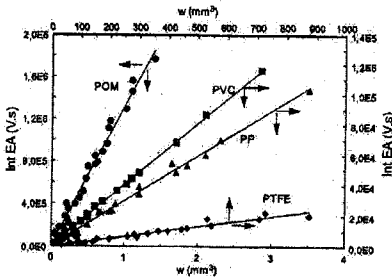


Fig. 1.15. Corelație între int EA și volumul de material uzat [27]

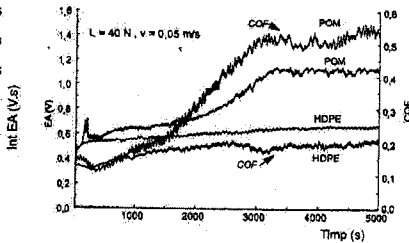


Fig. 1.16. Corelație între evoluția EA și COF în timp [27]

Variația liniară a pierderii de masă prin uzură cu emisia acustică totală a fost raportată în [27] din teste pe diferiți polimeri alunecând pe oțel durificat, în contact neconform. Autorii și-au bazat interpretarea acestor relații pe presupunerea că separarea fiecărei particule este o sursă izolată de EA, ambele evenimente fiind caracterizate de o probabilitate de distribuție similară. Se crede că tipul liniar este specific frecării plastic-metal, când adeziunea este dominantă. Materialele plastice au o comportare vâsco-elastică, susceptibilă la curgere și efecte termice particulare.

Figura 1.16 arată variații similare ale coeficientului de frecare (COF) și emisiei acustice pe durata a 5000 s de frecare pentru POM și HDPE. Tendințele sunt comparabile sugerând existența unei relații între acești parametri. Vârful COF sunt generate de adeziune care induce deformarea asperităților. Vârful inițial al semnalului EA este asociat cu detașarea inițială a materialului care are loc la acomodarea suprafețelor. Dar în ciuda trendului comparabil, nu s-a putut găsi nicio corelație între cei doi parametri, când s-au luat în considerare toți parametrii de testare. Pe de altă parte, există sugestii de corelare a EA cu lucrul mecanic de frecare de la alunecare. S-a încercat investigarea posibilității de identificare pentru tribosisteme cu materiale plastice. Lucrul mecanic de frecare F_w este definit cu relația:

$$F_w = \int F_f \cdot ds \quad (1.4)$$

și reprezintă variația în timp real a F_f (forței de frecare) integrată pe distanța de alunecare.

Lingard și Ng [221] au găsit o relație sistematică între emisia acustică și lucrul mecanic de frecare, folosind o configurație disc-pe-disc (unul fix) pentru șase materiale metalice și pentru condiții de testare în intervale largi. Khurshudov și Talke [188] au concluzionat că emisia acustică la interfață a fost proporțională cu lucrul mecanic de frecare în unitatea de timp (puterea consumată prin frecare).

S-a arătat astfel că este promițător să se stabilească o relație care poate fi utilă în previzionarea proprietăților tribologice (frecare și uzură) pentru tribosisteme similare, dacă există posibilitatea monitorizării semnalului emisiei acustice [18], [25], [27].

1.8. Direcții de cercetare

Această lucrare are ca scop studiul evoluției parametrilor stratului superficial în procesele de frecare și uzură ale materialelor compozite cu matrice de polibutilentereftalat prin teste de laborator pe model block-on-ring (prismă-pe-inel), funcționând în regim uscat de alunecare. Pentru aceasta, se au în vedere:

- realizarea unor rețete proprii de materiale pe bază de PBT (compozite și amestecuri polimerice);
- elaborarea unei metodologii de studiu interdisciplinar, care să permită o evaluare complexă a comportării mecanice și tribologice;
- caracterizarea fizică și mecanică a materialelor cu matrice de PBT, cu evidențierea influenței rețetei asupra lor;

268408



- evaluarea comportării tribologice a materialelor elaborate pe bază de PBT pe tribotesterul block-on-ring, cu ajutorul parametrilor de frecare și uzură;
- evaluarea influenței parametrilor de testare (viteză, lungime de alunecare, forță, material) asupra parametrilor tribologici;
- analiza proceselor tribologice din stratul superficial prin metode nedistructive (microscopie optică, SEM, EDX);
- realizarea de hărți de uzură pentru tribomodelele cu un element polimeric, în scopul comparării sistematice a materialelor cu matrice de PBT între cle și a comparării acestora cu alte materiale;
- modelarea contactului block-on-ring cu ajutorul elementului finit pentru determinarea distribuției de tensiuni și deformații și utilizarea rezultatelor pentru selectarea parametrilor de testare (forță, material);
- analiza calității suprafețelor (a microtopografiei) cu ajutorul profilometriei non-contact, pentru stabilirea corelației dintre parametrii de rugozitate și parametrii de testare.

CAPITOLUL 2

REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA TRIBOLOGICĂ A MATERIALELOR COMPOZITE PE BAZĂ DE PBT

2.1. Metodologie, materiale și echipamente utilizate

Există diferite abordări ale testelor de frecare și uzură ce diferă în funcție de mărimea și complexitatea elementului ce urmează a fi testat (fig. 2.1).

Categoria	Tipul de test	
I	teste în exploatare, la locul de funcționare	
II	teste pe stand, cu sistemul real întreg	
III	teste pe stand cu sisteme parțiale sau numai cu un subsansamblu	
IV	teste pe componente	
V	teste pe modele	
VI	teste de laborator (pe modele simplificate)	

Fig. 2.1. Tipuri de teste tribologice (adaptate după [85] și [266])

Testele de laborator au devenit atractive din trei motive: posibilitatea de a explora variante ale unei soluții, ocolirea sau reducerea semnificativă a riscurilor și, implicit, a costurilor asociate lor, și posibilitatea de a face măsurători și investigații de mare acuratețe pe un model controlabil, simplificat și miniaturizat.

Pentru tribotesterul ales pentru testarea în laborator, prismă-pe-inel, caracteristicile și parametrii relevanți sunt prezentați sintetic în figura 2.2.

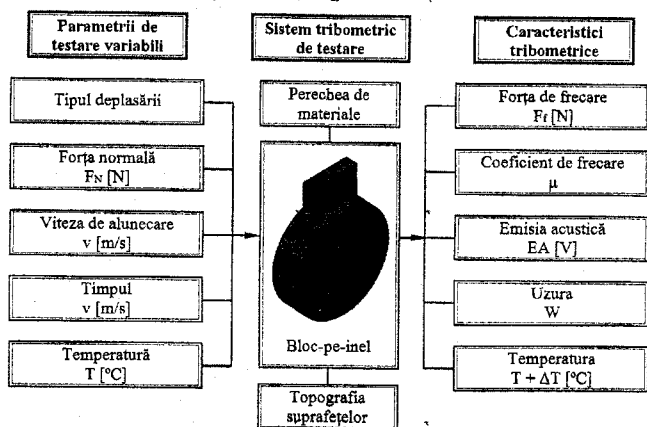


Fig. 2.2. Caracteristici și parametri relevanți pentru tribotesterul prismă-pe-inel (adaptat după [86], [266], [317])

Materialele folosite pentru acest studiu au fost produse prin injecție în matriță pentru epruveta-halteră normală tip 1A, conform SR EN ISO 527-2:2000 [426], la Institutul de Cercetări pentru Fibre Sintetice din Săvinești, pe o mașină de injecție de tip MI TP 100/50 (S.C. IMATEX Tg. Mureș). Acestea au o matrice de PBT cu denumirea comercială Crastin 6130 NC010 (furnizat în granule de DuPont, tabelul 2.1).

Granulele de PBT au fost uscate înainte de injecție pentru a elimina umezeala. În scopul asigurării celor mai bune performanțe pieselor injectate, conținutul rezidual de umiditate nu trebuie să depășească 0,04 % masice. Uscarea s-a realizat prin menținerea, timp de 2 ore, la o temperatură de ~120°C, în uscător.

După injecție (după 24 ore), produsele au fost supuse unui tratament termic, prin menținerea acestora, timp de 2 ore, la o temperatură de 175-180°C.

Rețetele pentru materialele compozite pe bază de PBT incluse în acest studiu au fost elaborate de autor pe baza documentației și au fost proiectate astfel încât să se evidențieze influențele materialelor de adaos asupra comportării tribologice în regim uscat.

Materialele (figura 2.4 și tabelul 2.2) au fost realizate în trei clase:

- prin aditivare cu microsferă de sticlă (fig. 2.3);
- prin aditivare cu PTFE, cu denumirea comercială NFF FT-1-1T® Flontech, cu dimensiunea medie a particulelor de ~20 μm [434];
- prin aditivarea concomitentă cu microsferă de sticlă și PTFE (compozit hibrid).

Tabelul 2.1. Proprietăți ale PBT - CRASTIN 6130 NC010® [398], [399]

Caracteristici	Valori
Temperatura maximă de lucru, [°C]	110...180
Limita la tracțiune, MPa	65
Duritate, Shore	90...95
Conductivitate termică, [W/m·K]	0,25
Coefficient de dilatare termică, [K ⁻¹]	90·10 ⁻⁵
Modul de elasticitate, [MPa]	3300
Deformație la curgere, [%]	23

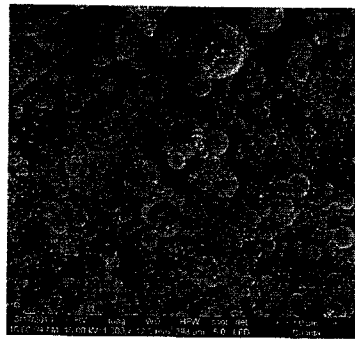


Fig. 2.3. Microsferă de sticlă înainte de a fi introduse în materialele compozite

Tabelul 2.2. Matériaie compozite pe bază de PBT

Simbolizarea materialului*	Compoziție [% , masic]				
	PBT	Microsferă de sticlă	PTFE	PA 66	Pigment negru
PBT	100	-	-	-	-
GB10	88	10	-	1,5	0,5
GB20	77,5	20	-	2	0,5
PF5	95	-	5	-	-
PF10	90	-	10	-	-
PF15	85	-	15	-	-
GB10-PF10	77,5	10	10	2	0,5

* Simbolizarea este păstrată în toate figurile din acest studiu de cercetare

Din motive tehnologice, pentru aditivarea cu microsferă de sticlă, s-au folosit (în concentrații mici) poliamidă PA cu denumirea comercială Relamid B-2Nf (pentru obținerea unei bune dispersii a microsferelor de sticlă) și pigment negru (negru de fum).

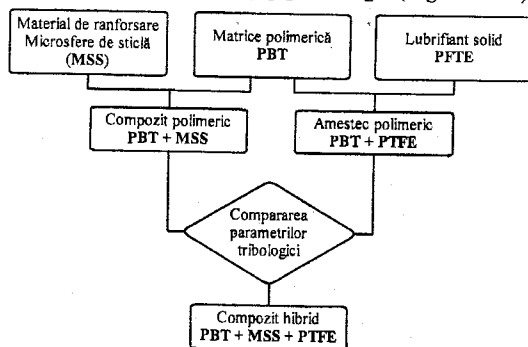


Fig. 2.4. Materialele testate

Concentrațiile de microsferă de sticlă și de PTFE s-au stabilit pe baza cercetărilor similare [65], [98], [108], [131], [136], [191], [370], [378], etc. Primul triboelement, blocul prismatic, a fost realizat prin debitare din epruvetele pentru încercări la tracțiune și are dimensiunile 16,5 mm × 10 mm × 4 mm (fig. 2.5). Pentru al doilea triboelement, au fost folosite inelele exterioare ale rulmenților cu role conice, tip KBS 30202 (DIN ISO 355/720), cu dimensiunile exterioare de Ø35 mm × 10 mm (fig. 2.6) și sunt realizate din oțel DIN 100Cr6 (tabelul 2.3), cu 60 - 62 HRC și Ra = 0,8 μm pe inelul exterior.

Formele și principalele dimensiuni ale cuplei de frecare cu contact liniar (tip Timken) sunt prezentate schematic în figura 2.6.

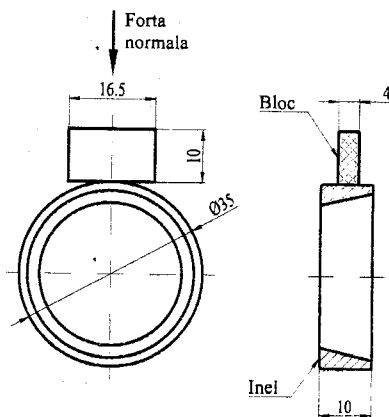


Fig. 2.5. Formele și principalele dimensiuni ale cuplei de frecare prismă-pe-inel

Tabelul 2.3. Compoziția chimică a oțelului pentru inele de rulment 100Cr6 (DIN 17230)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,90-1,05	0,15-0,35	0,25-0,45	≤0,030	≤0,025	1,35-1,65	≤0,30	≤0,30

În literatura de specialitate ([377], etc.) există studii referitoare la testele prismă-pe-inel care s-au realizat cu parametri de testare foarte variați. Setul de încercări pentru fiecare material este prezentat sintetic în tabelul 2.4.

Tabelul 2.4. Parametrii testului prismă-pe-inel, pentru un material

Forța de încărcare [N]	Viteza de alunecare [m/s]	Turația [rot/min]	Distanța de alunecare [m]		
			2500	5000	7500
$F_1 = 1 \text{ N}$	0,25	136,42	t = 166,67	t = 333,33	t = 500
	0,50	272,84	t = 83,30	t = 166,67	t = 250
	0,75	409,26	t = 55,56	t = 111,11	t = 166,67
$F_2 = 2,5 \text{ N}$	0,25	136,42	t = 166,67	t = 333,33	t = 500
	0,50	272,84	t = 83,30	t = 166,67	t = 250
	0,75	409,26	t = 55,56	t = 111,11	t = 166,67
$F_3 = 5 \text{ N}$	0,25	136,42	t = 166,67	t = 333,33	t = 500
	0,50	272,84	t = 83,30	t = 166,67	t = 250
	0,75	409,26	t = 55,56	t = 111,11	t = 166,67

t = timpul necesar parcurgerii distanței, respectiv durata unui test, [min.]

Pentru evaluarea uzurii masice a fost folosită a balanță analitică METTLER TOLEDO, cu precizia de măsurare de 0,1 mg.

Imaginile SEM au fost realizate cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj Quanta 200 3D din dotarea Facultății de Mecanică din cadrul Universității Tehnice „Gheorghe Asachi” din Iași și a microscopului electronic cu baleiaj FEI Quanta 200 din dotarea Facultății de Metalurgie, Știința Materialelor și Mediu din cadrul Universității „Dunărea de Jos” din Galați, cu o rezoluție de 4 nm, putere de mărire $\times 1.000.000$ și analiza cu spectrometrul EDX.

2.2. Rezultate experimentale privind coeficientul de frecare

2.2.1. Măsurarea coeficientului de frecare

Pentru monitorizarea coeficientului de frecare, tribometrul Universal UMT-2 (CETR®, SUA) are un traductor care măsoară în timp real forța de frecare și calculează coeficientul de frecare în funcție de forța normală și forța rezistentă la momentul oarecare t al testului. Programul dedicat al tribometrului [392] permite vizualizarea parametrilor mășurați și calculați (fig. 2.6).

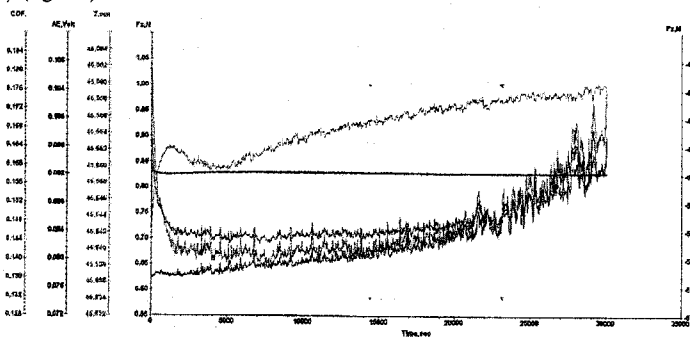


Fig. 2.6. Exemplu de parametri monitorizați în timp real pe tribometrul UMT-2
 Material prismă – PBT, material inel – 100Cr6, $F = 5 \text{ N} = F_z$, $v = 0,25 \text{ m/s}$, $L = 7500 \text{ m}$
 COF - coeficientul de frecare, F_x - forța rezistentă (de frecare), AE - cmisia acustică,
 Z – adâncimea de uzură (apropierea între prismă și inel), F_z - forța normală.

2.2.2. Influența parametrilor de testare asupra coeficientului de frecare

PBT are valorile medii ale coeficientului de frecare în cel mai îngust interval, cu valori medii mai mari pentru distanța de alunecare $L = 7500$ m. Creșterea mediei se poate explica prin eliminarea particulelor de uzură relativ mari, caracteristice acestui polimer.

Valorile pentru $F = 5$ N se grupează sub 0,2 pentru toate vitezele.

I. Compozitele PBT + MSS

Pentru $L = 7500$ m, cel mai mare interval de împrăștiere s-a obținut pentru PBT și nu pentru compozite.

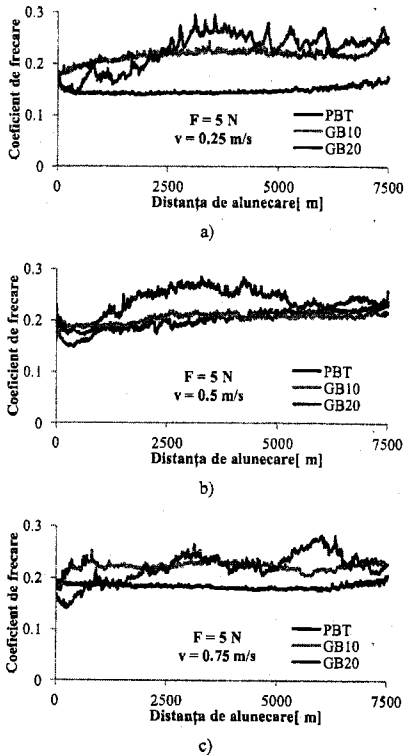


Fig. 2.7. Coeficientul de frecare pentru compozite PBT + MSS, pentru $F = 5$ N

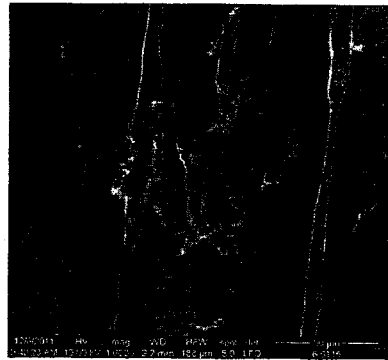


Fig. 2.8. Imagine SEM – PBT + 10% MSS, $v = 0,25$ m/s, $F = 5$ N, $L = 7500$ m

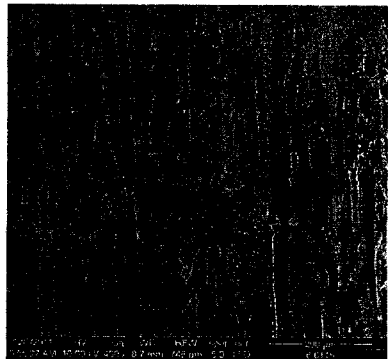


Fig. 2.9. Imagine SEM a blocului din GB10
Condiții de testare: $v = 0,25$ m/s, $F = 5$ N, $L = 7500$ m

Compozitele PBT + 10% MSS și PBT + 20% MSS au valorile medii împrăștiate pentru forțe normale mici. Pentru $F = 1$ N (fig. 2.11) este greu de stabilit o relație de dependență a coeficientului de frecare de concentrația materialului de adaos și de viteza de testare. Se observă însă intervale mai mari de valori pentru PBT + 20% MSS.

La viteza $v = 0,25$ m/s predomină uzura abrazivă, polimerul fiind agățat și tras din stratul superficial în micro-volume mai mari decât la viteze mai mari (fig. 2.8 și 2.9).

La viteza de 0,75 m/s, influența sarcinii normale asupra valorii medii a coeficientului de frecare este aceeași: crește de la 0,12 pentru $F = 1$ N, la $\sim 0,2$ pentru $F = 5$ N.

Pentru PBT + 20% MSS, la $F = 2,5$ N, împrăștierea este cea mai mare. Cauza probabilă ar putea fi procesele de micro-așchiere, care se reduc pe măsură ce viteza de alunecare crește. Nu s-au observat procese de târare a microsferelor de sticlă, ceea ce înseamnă că interfața dintre MSS și matricea polimerică este mai greu de distrus comparativ cu, de exemplu, mobilitatea MSS în sensul de alunecare, dar și în adâncimea stratului superficial, observate la compozite cu același tip de MSS, dar înglobate în compozite cu matrice de PA [98].

Valorile coeficientului de frecare au tendința să fie puțin dependente de viteză pentru $F = 5$ N (fig. 2.7), ceea ce poate recomanda aceste materiale pentru funcționare cu viteze de lucru diferite (necesare unui anumit proces tehnologic), fără consumuri energetice mult diferite.

Valorile extreme ale coeficientului de frecare pot fi determinate de generarea particulelor de uzură, trecerea peste o microsferă de sticlă (sau un grup), după eliminarea preferențială a polimerului din stratul superficial, chiar spargerea lor. Dacă în alte studii asupra compozitelor polimerice cu MSS, nu s-au observat spargeri ale microsferelor de sticlă, pentru compozitele cu matrice de PBT, s-au observat câteva MSS sparte, în general cele de dimensiuni mai mari (20...40 μm) (fig. 2.15). În figura 2.9 s-au observat patru microsferă de sticlă sparte pe o suprafață de $\sim 600 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$. Un asemenea eveniment în contact poate crea oscilații mari ale coeficientului de frecare.

Din studiul imaginilor la microscopul electronic (fig. 2.10), s-a constatat că particulele de uzură, formate mai mult din polimer, aderă unele de altele, sunt în general mari (comparativ cu alți polimeri) și voluminoase (nu laminate, subțiri, ca în cazul PTFE, de exemplu [275], [326]). În general sunt evacuate MSS de dimensiuni mici, iar polimerul din jurul celor mari este desprins. În acest scenariu, una sau mai multe MSS vor prelua o sarcină suficient de mare din forța aplicată încât să se spargă.

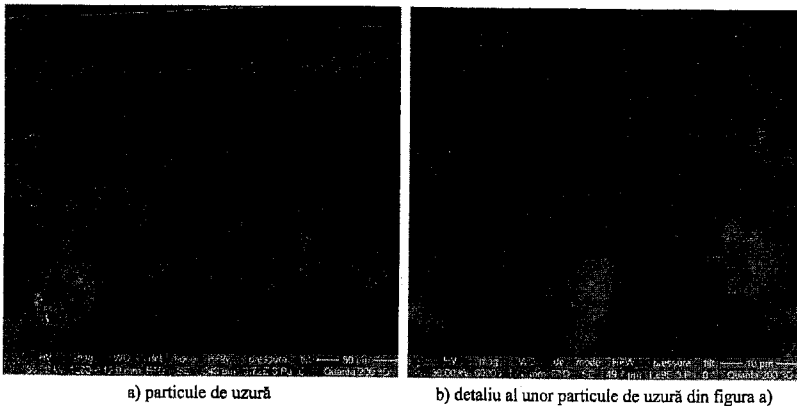


Fig. 2.10. Aspect al particulelor de uzură formate în timpul deplasării blocului din PBT + 20% MSS pe inelul metalic, la marginea urnei de uzură. Condiții de testare: $F = 5$ N, $v = 0,75$ m/s, $L = 7500$ m

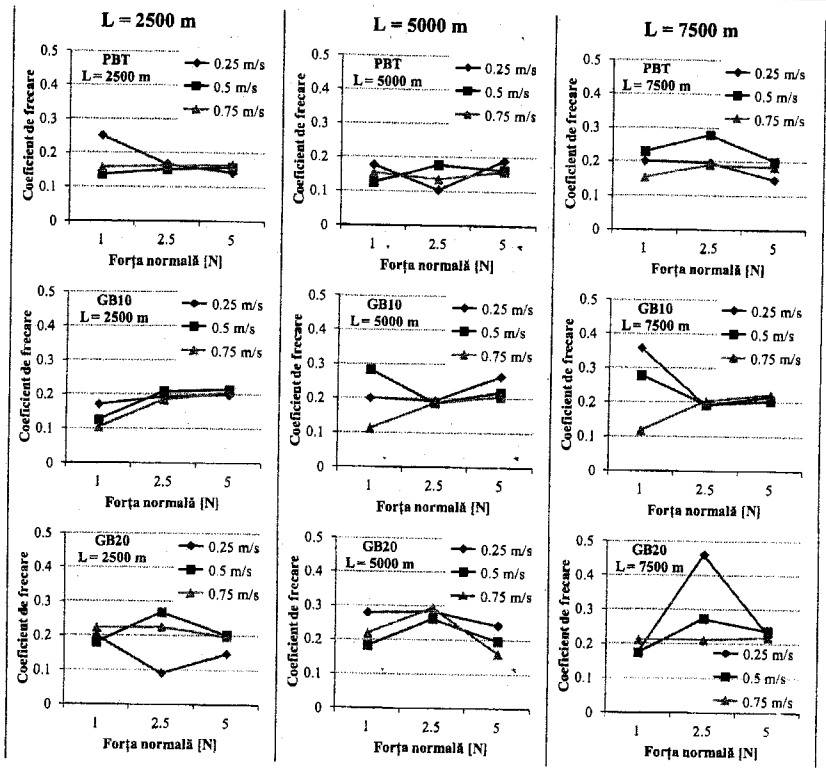


Fig. 2.11. Influența forței normale asupra coeficientului de frecare pentru PBT și compozitele cu microsferă de sticlă

II. Amestecurile polimerice PBT + PTFE

Valorile medii ale coeficientului de frecare au o ușoară tendință de creștere.

Pentru PBT + 5% PTFE și PBT + 10% PTFE, aceste valori medii sunt mai grupate. Pentru PBT + 15% PTFE valorile se împrăștie mai mult, între 0,06 și 3,2, mai ales pentru distanțele de alunecare de 5000 m și 7500 m; există tendința de scădere a coeficientului de frecare o dată cu creșterea forței, fapt evidențiat și în alte studii cu polimeri sau amestecuri de polimeri [325].

Există o tendință de scădere a coeficientului mediu de frecare, pentru toate amestecurile PBT + PTFE, la viteza de $v = 0,75$ m/s (fig. 2.12). La $F = 5$ N, amestecurile polimerice au coeficientul de frecare, în general, mai mic la $v = 0,5$ m/s și $v = 0,75$ m/s, probabil pentru că PTFE se detașează în micro-benzi mai mari la viteze mici, atunci când este în cantitate mai mare (15%), asigurând, prin laminarea și transferul PTFE, o reducere a frecării.

Adaosul de PTFE (în cele trei concentrații) în PBT prezintă o ușoară tendință de scădere a coeficientului de frecare, dar nu atât de evidentă cum a fost raportată în cercetări cu

amestecuri de PTFE în PEEK [65] sau în EPDM, PI, PPEsk, poliesteri [275], polimeri epoxidici, în care scăderea coeficientului de frecare a fost cu 30%...50% din valoarea obținută pentru polymerul neaditivat cu PTFE. Cu alte cuvinte, dacă interesează un coeficient de frecare redus, PBT ar putea fi folosit fără aditivare cu PTFE, dacă îndeplinește și alte criterii cerute de proiectant (regim termic suportabil, uzură redusă etc.).

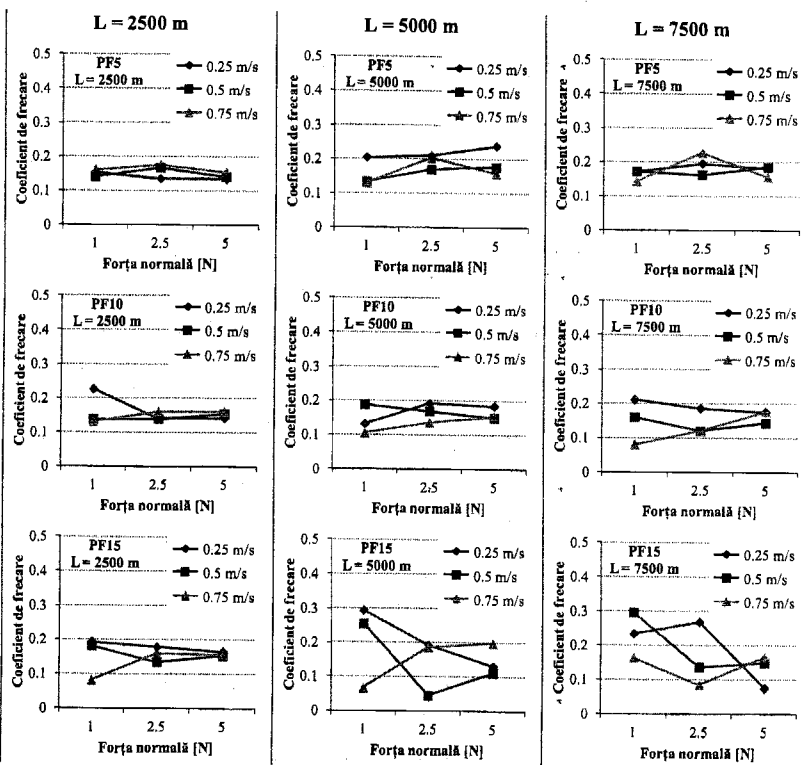


Fig. 2.12. Influența forței normale asupra coeficientului de frecare pentru PBT, PF5, PF10, PF15

III. Compozitul hibrid (PBT + MSS + PTFE)

Creșterea vitezei de alunecare provoacă scăderea coeficientului de frecare spre valoarea obținută în teste cu prismă din PBT, dar oscilațiile sunt tipice compozitelor cu elemente dure [136]. Cauza: deși există microsferă de sticlă care ar duce la creșterea coeficientului de frecare, așa cum este evidențiat și în [305], prezența PTFE face ca această tendință să fie estompată de mecanismele specifice de reducere a frecării ale acestui polimer (înglobarea MSS, transfer, chiar dacă este insular). Dacă s-ar considera coeficientul de frecare constant și cât mai redus criteriul principal de selectare dintre cele două materiale, pentru forța $F = 5 \text{ N}$, polymerul îndeplinește mai bine această cerință.

Din analiza particulelor de uzură s-a constatat că nu se elimină din stratul superficial prea multe microsferă de sticlă, adică nu se dislocă volume de compozit care să cuprindă aproximativ aceeași concentrație de microsferă de sticlă ca și materialul de bază, ci se îndepărtează prin uzare mai mult amestecul de PBT cu PTFE.

Dacă pentru intervalul de viteze și forțe testate, polimerul prezintă o tendință de scădere a valorii medii a coeficientului de frecare cu creșterea forței, compozitul hibrid are valoarea medie a coeficientului de frecare ușor crescătoare cu forța (fig. 2.13), tendință evidentă mai mult pentru viteza $v = 0,25$ m/s din cauză că predomină componenta abrazivă a uzurii. La creșterea vitezei, polimerii se înmoaie și se transferă mai ușor, chiar dacă pentru amestecul PBT + 10% MSS + 10% PTFE transferul nu este uniform și are caracter insular.

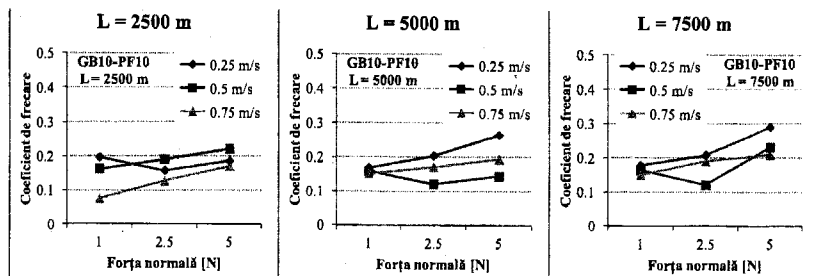


Fig. 2.13. Influența forței normale asupra coeficientului de frecare pentru PBT și compozitul hibrid GB10-PF10

2.2.3. Sinteza datelor experimentale cu privire la coeficientul de frecare

Pentru a compara cele trei clase de materiale testate, s-a reprezentat grafic, în funcție de viteza de alunecare, forță și distanța de alunecare, valorile extreme ale coeficientului de frecare și valoarea medie (calculate pe durata testului). Astfel, se poate aprecia stabilitatea coeficientului de frecare (prin mărimea intervalului de împrăștiere) și consumul energetic al cuplei de frecare prin valoarea medie a aceluiași parametru.

Pentru aplicații cu condiții de lucru similare ca viteză și forță, ar fi recomandabile materialele cu interval cât mai mic de împrăștiere și valori medii cât mai reduse.

Forțele și vitezele mici produc un interval mare de împrăștiere a valorilor coeficientului de frecare, în timp ce creșterea forței și vitezei coboară valoarea medie și îngustează intervalul de oscilație.

Un raport de cercetare de la NASA din 1971 a evidențiat valori medii ale coeficientului de frecare mari, de peste 0,6, pentru trei polimeri alunecând pe oțel (tribotester bilă din polimer pe disc de oțel).

Din aceste studii și din datele experimentale obținute se evidențiază importanța testelor de laborator pentru evaluarea coeficientului de frecare.

I. Compozitele PBT + MSS

La $F = 1 \text{ N}$ și $v = 0,25 \text{ m/s}$, s-a observat un interval mare de împrăștiere pentru coeficientul de frecare; predomină procesul de așchiere și evenimente în care sunt implicate microsferile de sticlă (trecerea peste ele a asperităților dure, spargerea lor, îngroparea în matrice). Dublarea vitezei ($v = 0,5 \text{ m/s}$) determină scăderea mediei coeficientului de frecare, la $0,12...0,22$ pentru polimer și $0,15...0,28$ pentru compozite. La $v = 0,75 \text{ m/s}$, comportarea ambelor compozite este mai bună, coeficientul de frecare stabilizându-se în jurul valorii de $0,2$. Este probabil că polimerul se încălzește, își reduce proprietățile mecanice până la a forma o peliculă vâscoasă care, deși nu este înlăturată din contact (ca în cazul altor polimeri), permite reducerea frecării și prin înlesnirea îngropării microsferelor de sticlă.

Pentru $F = 2,5 \text{ N}$, valoarea medie a coeficientului de frecare are o ușoară tendință de creștere cu distanța de alunecare și cu concentrația de microsferi de sticlă, dar intervalul de împrăștiere este mai mare pentru $L = 7500 \text{ m}$.

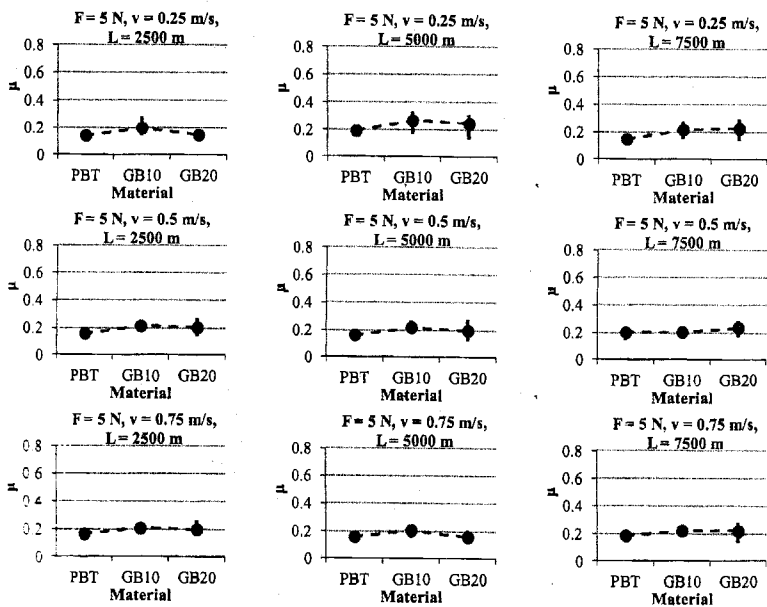


Fig. 2.14. Influența concentrației de MSS asupra coeficientului de frecare pentru $F = 5 \text{ N}$

La $F = 5 \text{ N}$, valorile parametrilor analizați au scăzut (fig. 2.14), ceea ce confirmă rezultatele altor cercetări, că sarcinile mici duc la o frecare mai intensă pentru cuplurile de frecare cu elemente din polimeri sau compozite polimerice și elemente dure (oțel). Forța pentru care coeficientul de frecare se reduce depinde de forma, mărimea triboelementelor și de condițiile de lucru.

II. Amestecurile PBT+PTFE

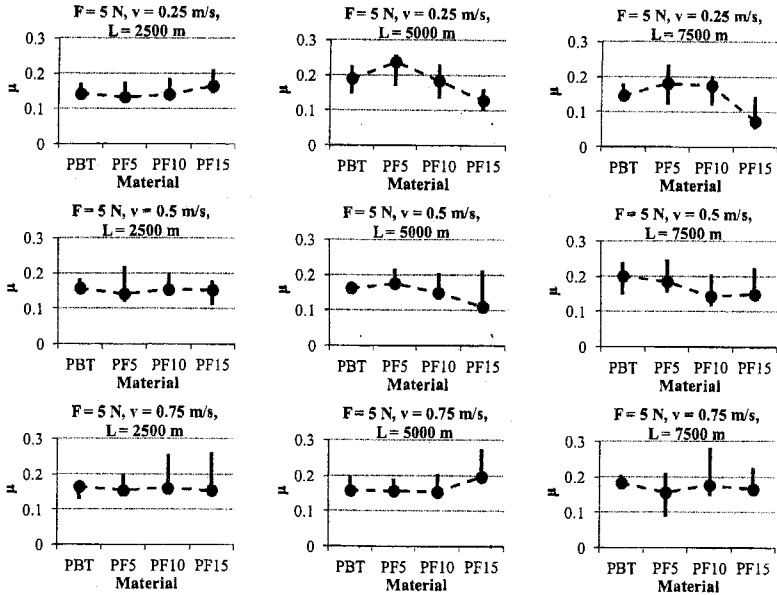


Fig. 2.15. Influența concentrației de PTFE asupra coeficientului de frecare pentru $F = 5 \text{ N}$

Aceiași fenomene de scădere a coeficientului de frecare cu sarcina și de reducere a intervalului de împrăștiere a valorilor acestuia s-a observat și la testarea blocurilor din PBT + PTFE (fig. 2.15). Pentru că valoarea medie este spre partea inferioară a intervalului de împrăștiere este foarte probabil că apar procese rare, dar care ridică destul de brusc coeficientul de frecare. Cauzele probabile ar fi: formarea și trecerea prin contact a particulelor mari de uzură, o dispersie locală neuniformă a PTFE, formarea de pelicule de transfer neuniforme. La $v = 0,75 \text{ m/s}$ valorile medii ale coeficientului de frecare sunt foarte puțin influențate de concentrația de PTFE în PBT.

Valorile punctuale mai mari pot fi rezultatul formării de particule tip conglomerat pe principiul descris de Stachowiack [304], [305] și confirmat de imagini SEM (fig. 2.16). Particulele de uzură de acest tip sunt un amestec din cele două materiale în contact, sau, cum este cazul aici, un amestec polimeric, care cresc în volum și sunt presate în contact, rezultând o structură lamelară (la PTFE), deseori cu proprietăți mecanice mai ridicate, sau micro-

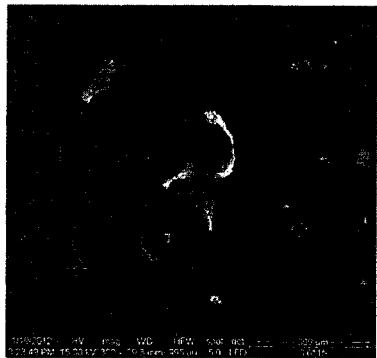


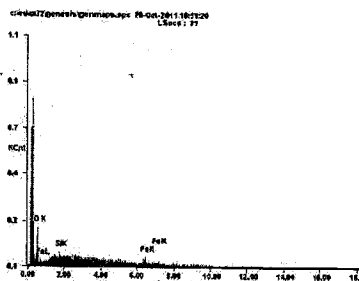
Fig. 2.16. Particule de uzură rezultate dintr-un amestec PBT + 15% PTFE, pe un inel din oțel

volume cu aspect globular (în cazul PBT). Aceste particule mari și rezistente mecanic sunt greu de evacuat din contact, iar la presiuni mari apar microaderențe puternice între micro-volume de același material, unele între particulele de uzură între ele și altele între particulele deja formate și suprafețele triboelementelor. Analize EDX au confirmat și prezența unor mici (și rare) particule metalice desprinse de pe inel (fig. 2.17) în particulele de uzură.

PTFE scade valoarea medie a coeficientului de frecare, în special pentru $v = 0,5$ m/s și $v = 0,75$ m/s, dar în acest studiu, la 15% PTFE are o ușoară tendință de creștere, mai ales la sarcini mici, probabil pentru că forța normală fiind mică, PTFE se detașează mai ușor și în benzii sau laminate mai mari. O altă explicație ar fi o dispersie neuniformă a PTFE în PBT.



a) imagine SEM



b) analiza elementelor pentru zona din a)

Fig. 2.17. Particule de uzură rezultate la alunecarea blocului din PF10 pe inel de oțel

Pentru $F = 5$ N, s-a constatat o tendință de scădere a valorii medii a coeficientului de frecare, dar nu așa de pronunțată cum s-a obținut pentru PTFE introdus în alți polimeri [275]. Tot pentru această forță, intervalul de împrăștiere este mult redus. Evenimentele din contact care ridică acest parametru sunt rare pentru că valoarea medie se încadrează spre limita inferioară a intervalului de împrăștiere.

III. Compozitul hibrid PBT + MSS + PTFE

Nu coeficientul de frecare va fi un parametru cheie în selectarea unuia dintre cele două materiale, PBT sau compozitul hibrid PBT + 10% MSS + 10% PTFE. Cu excepția testelor pentru PBT neaditivat, la $F = 2,5$ N, $v = 0,5$ m/s și $L = 7500$ m, valorile medii se încadrează între 0,08 și 0,22, valori acceptate pentru regim uscat (fig. 2.18). Creșterea vitezei de alunecare provoacă scăderea coeficientului de frecare. Cauza: deși există microsferă de sticlă care ar duce la creșterea coeficientului de frecare, așa cum este evidențiat pentru compozitele PBT + MSS, prezența PTFE face ca această tendință să fie estompată de mecanisme specifice de reducere a frecării ale acestui polimer. Dacă s-ar considera coeficientul de frecare constant și cât mai redus criteriul principal de selectare dintre cele două materiale, pentru forța $F = 5$ N polimerul neaditivat îndeplinește mai bine aceste cerințe.

Figura 2.19 prezintă imagini SEM care arată cauze probabile ale creșterii bruște a coeficientului de frecare pentru acest compozit hibrid.

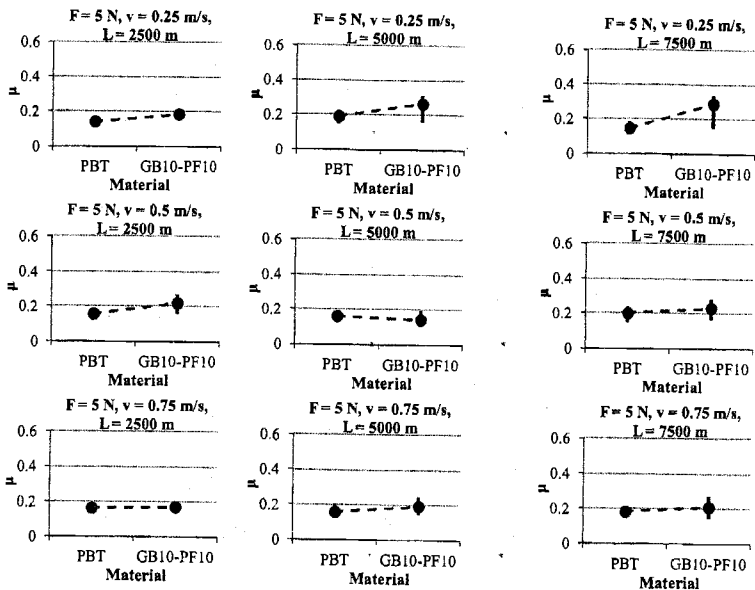
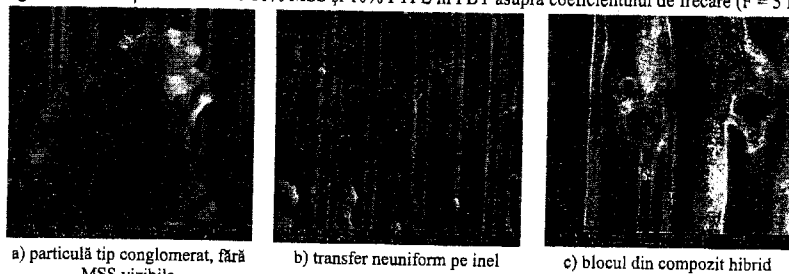


Fig. 2.18. Influența adaosului de 10% MSS și 10% PTFE în PBT asupra coeficientului de frecare ($F = 5 \text{ N}$)



a) particulă tip conglomerat, fără MSS vizibile

b) transfer neuniform pe inel

c) blocul din compozit hibrid

Fig. 2.19. Evenimente care determină oscilații mari ale coeficientului de frecare pentru teste cu bloc din PBT + 10% MSS + 10% PTFE pe inel de oțel, $F = 5 \text{ N}$, $v = 0,75 \text{ m/s}$, $L = 7500 \text{ m}$

2.2.4. Concluzii privind coeficientul de frecare

Adăugarea de microsferă de sticlă în PBT crește coeficientul de frecare aproximativ liniar cu concentrația de MSS, respectiv cu câte 15 procente pentru fiecare 10% MSS.

Amestecurile de PBT cu PTFE nu au avut comportarea așteptată, respectiv o reducere a valorii medii a coeficientului de frecare. Acesta a scăzut nesemnificativ (cu aproximativ 3%) când a fost adăugat PTFE în proporție de 5% și 15% în materialul de bază, PBT. Proporția optimă de PTFE în PBT, pentru materialele analizate, este de 10%, valoare la care coeficientul de frecare se îmbunătățește, scăzând cu ~12%.

Adăugarea de 10% PTFE în amestecul de PBT cu 10% MSS, anulează tendința de creștere a coeficientului de frecare, acesta rămânând aproximativ același cu cel al PBT.

2.3. Rezultate experimentale privind parametrii de uzură

2.3.1. Rezultate privind parametrii de uzură

Având în vedere variabilele implicate în această lucrare (materialul, prin natura și concentrația adaosurilor, viteza, forța normală și distanța de alunecare) și studii recente asupra parametrizării uzurii [22], [53], [86], [117], [127], [244], s-au ales intensitatea liniară specifică de uzură (WI) și rata specifică de uzură (Ws) pentru o sinteză a rezultatelor experimentale privind uzura.

$$\text{Intensitatea liniară specifică de uzură: } WI = \frac{\Delta Z}{F \cdot L} \left[\mu\text{m}/(\text{N} \cdot \text{km}) \right] \quad (2.1)$$

$$\text{Rata specifică de uzură: } Ws = \frac{V}{F \cdot L} = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F \cdot L} \left[\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m}) \right] \quad (2.2)$$

unde ΔZ [μm] este uzura liniară (înregistrată de tribometru la sfârșitul unui test), F [N] este forța normală, iar L [m] este distanța de alunecare, V [mm^3] este volumul de material pierdut prin uzură, Δm [g] este pierderea de masă a blocului, determinată ca fiind diferența dintre masa inițială și masa finală a unui triboelement (după efectuarea testului), ρ [g/mm^3] este densitatea materialului blocului testat.

Au fost realizate, în MATLAB R2009b, hărți de uzură pentru materialele pe bază de PBT, în funcție de forța normală și viteza de alunecare, utilizând o interpolare cubică.

Pentru PBT (fig. 2.20 și 2.22) se observă:

- o creștere semnificativă a parametrilor de uzură cu scăderea forței aplicate; cauza ar fi creșterea ponderii uzurii abrazive la sarcini mici și lipsa unui transfer pe suprafața dură;
- o creștere aproape liniară a intensității specifice liniare de uzură pentru $F = 5$ N odată cu creșterea vitezei, ceea ce implică o intensificare a proceselor de uzură fără schimbarea naturii lor, panta fiind mărită și de efectul dilatării;
- pentru toate vitezele de alunecare testate, tendința de variație a uzurii în funcție de forța normală este aceeași pentru ambii parametri, cu o zonă de minim în jurul valorii de 4 N.

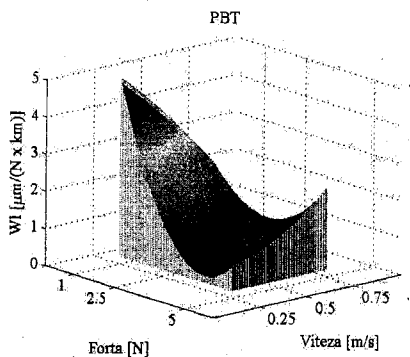


Fig. 2.20. Intensitatea specifică liniară de uzură a blocurilor de PBT

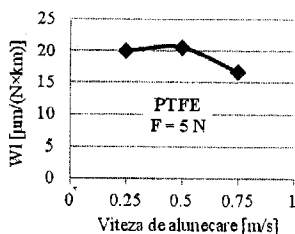


Fig. 2.21. Intensitatea specifică liniară de uzură a blocurilor de PTFE

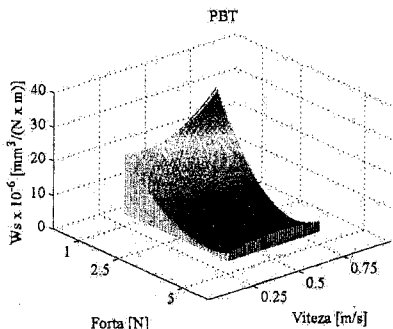


Fig. 2.22. Rata specifică de uzură a blocurilor de PBT

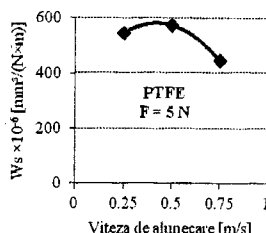


Fig. 2.23. Rata specifică de uzură a blocurilor de PTFE

Cele două hărți de uzură, realizate pentru parametri diferiți, sunt diferite. O explicație ar fi faptul că dacă în rata specifică de uzură, W_s , uzura este doar volumul de material pierdut în timpul testului, în intensitatea specifică liniară de uzură, W_l , se suprapun trei efecte: pierderea de material (pe o direcție), dilatarea și deformarea plastică, nefiind inclusă și revenirea elastică, deoarece ΔZ este măsurat în timp real, fiind diferența dintre valoarea înregistrată la începutul testului (când cele două elemente vin în contact) și cea de la sfârșitul testului.

Pentru a evalua comparativ PBT cu un alt polimer, s-au făcut teste pentru $F = 5 \text{ N}$, pentru vitezele testate și s-a calculat intensitatea specifică liniară de uzură (fig. 2.21) și rata specifică de uzură pentru blocuri din PTFE (fig. 2.23). S-a constatat că uzura PTFE, exprimată prin W_l , este ~20 de ori mai mare, iar W_s este de ~100 de ori mai mare decât a PBT în aceleași condiții de testare, diferența fiind ceva mai mică pentru $v = 0,75 \text{ m/s}$, când procesul de transfer al PTFE domină componenta de abraziune, mai severă la viteze mici [37], [187], [215], [335].

I. Pentru compozitele PBT + MSS, analizând figurile 2.24 și 2.25, se observă:

- o zonă de valori minime pentru compozite, pentru $v = 0,25 \dots 0,50 \text{ m/s}$ și $F = 2,5 \dots 5 \text{ N}$;
- o creștere accentuată a parametrilor de uzură pentru forțe sub 2,5 N, cu valori mai mari ale intensității liniare specifice de uzură, respectiv mai mici ale ratei specifice de uzură, pentru compozitul cu 10% MSS ;

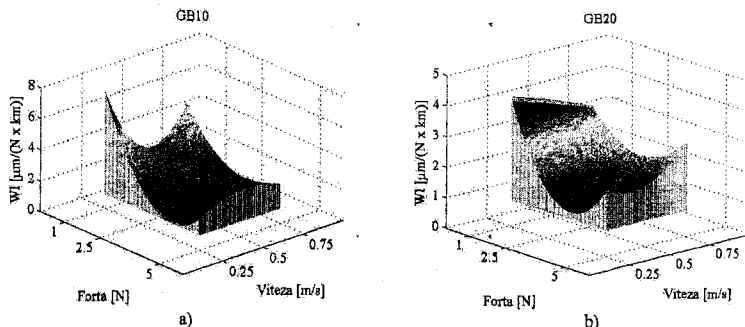


Fig. 2.24. Intensitatea specifică liniară de uzură pentru materialele compozite PBT + MSS

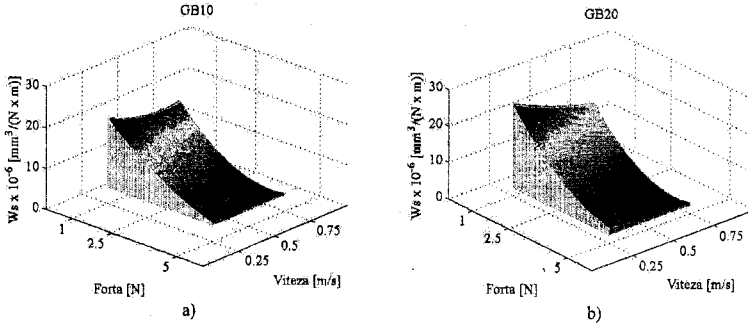


Fig. 2.25. Rata specifică de uzură pentru materialele compozite PBT + MSS

- pentru $v = 0,75$ m/s, tendința de creștere a intensității specifice liniare de uzură este diminuată spre $F = 1$ N, probabil din cauza dilatării polimerului;
- rata specifică de uzură descrește aproape liniar cu creșterea forței normale și descrește nesemnificativ cu creșterea vitezei; W_s este mai mică pentru ambele materiale compozite, comparativ cu PBT, valoarea cea mai mică înregistrându-se pentru GB20, la $F = 5$ N.

II. Amestecurile polimerice PBT + PTFE (fig. 2.27 și 2.28):

- pentru $F = 5$ N, cu excepția PF5, celelalte amestecuri au atât intensitatea liniară specifică de uzură, cât și rata specifică de uzură, aproape insensibile cu creșterea vitezei;
- tot cu excepția PBT + 5% PTFE, cea mai mare intensitate liniară specifică de uzură se obține la $F = 1$ N și $v = 0,25$ m/s;
- pentru PF15 s-a obținut cea mai mică valoare a intensității specifice liniare de uzură, iar pentru PF5, cea mai mică valoare a ratei specifice de uzură, pentru $F = 5$ N;
- în general, adaosul de PTFE în PBT scade uzura acestuia; o cauză ar fi generarea unei pelicule de transfer, chiar discontinuă din amestec de PBT + PTFE (acesta din urmă în concentrații relativ mai mari decât materialul de bază, dar calitativ, foarte diferite – figura 2.29);
- tendința de scădere a parametrilor de uzură nu este atât de evidentă, așa cum a fost raportată în literatura de specialitate pentru PEEK + PTFE [65], poliesteri + PTFE [275], comparativ cu materialul de bază;
- calitatea dispersiei pulberii de PTFE în PBT este foarte importantă în reducerea uzurii; de exemplu, calitatea dispersiei la 15% PTFE din figura 2.26 este bună, dar imaginea din figura 2.30 arată o aglomerare de PTFE care va neuniformiza comportarea blocului la testare: oscilații mari ale coeficientului de frecare și uzură preferențială a zonelor bogate în PTFE.

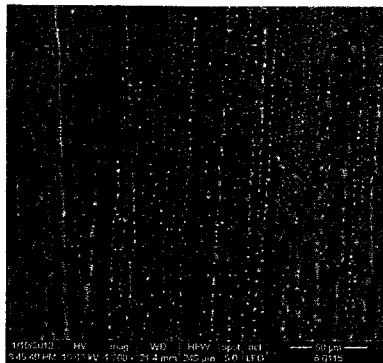
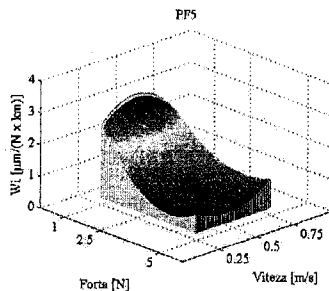
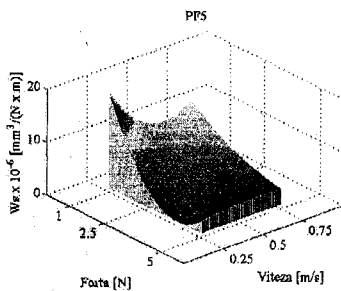


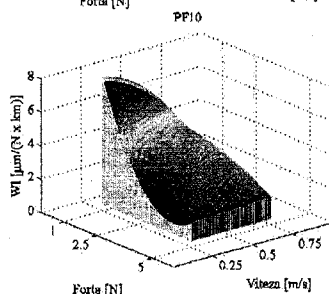
Fig. 2.26. Suprafața blocului din PBT + 15% PTFE după testare la $v = 0,25$ m/s, $L = 7500$ m, $F = 5$ N



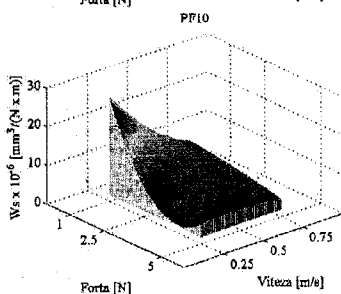
PP5



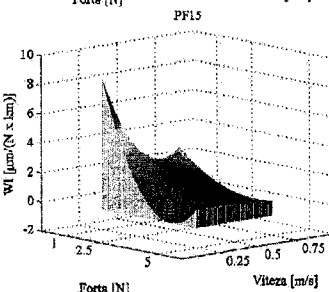
PP5



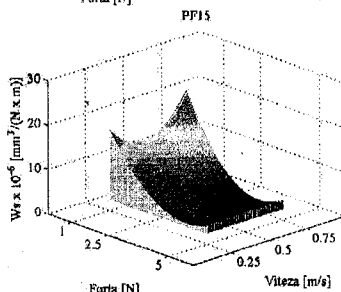
PP10



PP10



PP15



PP15

Fig. 2.27. Intensitatea specifică liniară de uzură pentru materialele PBT + PTFE

Fig. 2.28. Rata specifică de uzură pentru amestecurile polimerice PBT + PTFE

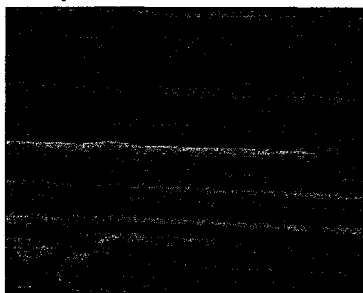


Fig. 2.29. Peliculă de transfer pe inelul metalic după testarea blocului din PBT + 10% PTFE
Condiții de testare: $F = 5 \text{ N}$, $v = 0,75 \text{ m/s}$, $L = 7500 \text{ m}$

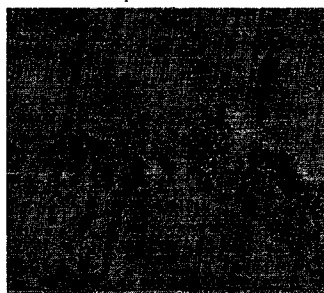
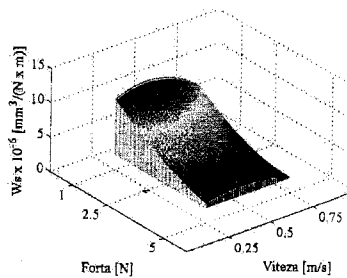
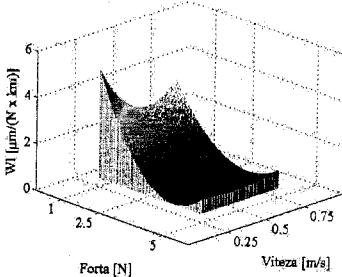


Fig. 2.30. O zonă de uzură de pe blocul din PBT + 10% PTFE, cu o aglomerare de PTFE

III. Compozitul hibrid PBT + 10% MSS + 10% PTFE (fig. 2.31):

GB10-PF10

GB10-PF10



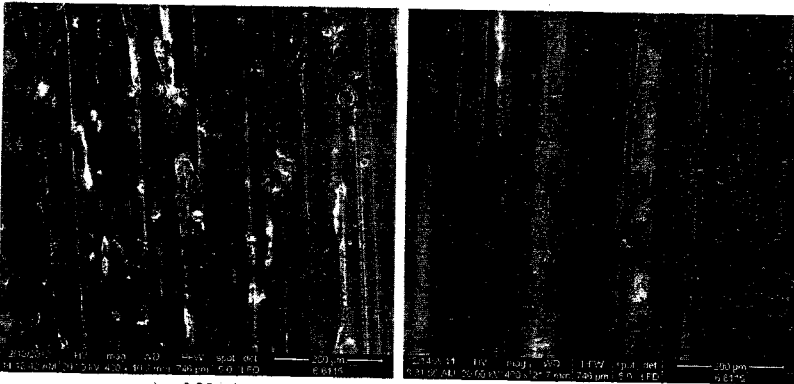
a) Intensitatea liniară specifică de uzură

b) Rata specifică de uzură

Fig. 2.31. Hărți de uzură pentru compozitul hibrid PBT + 10% MSS + 10% PTFE

- adaosul de microsferă de sticlă și PTFE reduce uzura, în special la vitezele mai mari, de 0,5 ... 0,75 m/s;

- pentru $F = 5$ N, parametrii de uzură nu sunt aproape deloc influențați pe intervalul vitezei de alunecare 0,25 ... 0,75 m/s, ceea ce îl recomandă pentru regimuri variabile de viteză (figura 2.32 arată zone de frecare a blocurilor din compozit hibrid și în care se observă asemănarea dintre ele).



a) $v=0,25$ m/s

b) $v=0,75$ m/s

Fig. 2.32. Imagini SEM ale zonelor de uzură pentru blocuri din GB10-PF10 ($F = 5$ N, $L = 7500$ m)

În privința **intensității specifice liniare a uzurii** s-au constatat următoarele:

- adaosul de PTFE în PBT are tendința să reducă intervalul de împrăștiere al valorilor intensității liniare specifice de uzură;

- la $v = 0,25$ m/s tendința este de ușoară creștere cu concentrația de PTFE, ceea ce indică faptul descris și în alte lucrări de specialitate [275], respectiv că PTFE are o uzură relativ mare în regim uscat;

- ușoara reducere a parametrului de uzură poate fi pusă și pe seama transferului caracteristic al PTFE pe suprafețe metalice, spre deosebire de PBT care realizează doar un

transfer "insular", care nu reduce componenta abrazivă de care este răspunzătoare mai mult suprafața dură conjugată.

Un efect semnificativ asupra intensității liniare specifice de uzură se observă la concentrația de 20% MSS. Dacă valoarea acestui parametru nu variază prea mult cu concentrația de microsferă de sticlă, comparativ cu alte clase de compozite cu același material de adaos, dar cu matrice polimerică de altă natură (PEEK, PA, PC), în schimb intervalul de împrăștiere al rezultatelor este mai mic pentru compozite, cu alte cuvinte, aceste materiale sunt mai predictibile decât PBT. Nu se poate extrapola această idee la alte tipuri de polimeri, comportarea PBT fiind particulară. De obicei se fac comparații cu polimerii care, în condiții similare de testare, determină fie coeficienți de frecare mici (așa cum este PTFE), fie o uzură redusă (PEEK, PPS). Având în vedere documentația studiată, dacă unul din triboelemente este polimeric, proiectatul va fi nevoit să accepte un compromis în funcție de criteriul tribologic principal de selectare: o frecare redusă sau o uzură redusă. Este adevărat că în cazul unor compozite polimerice reducerea uzurii se realizează doar cu o acceptabilă creștere a coeficientului de frecare, dar nu este o regulă generală în comportarea acestor compozite în regim uscat.

Compozitul hibrid manifestă o tendință de scădere a parametrului de uzură și o contractare a intervalului de împrăștiere a rezultatelor. Prezența microsferelor de sticlă în straturile superficiale reduce tendința de agățare a PTFE și PBT.

În privința **ratei specifice de uzură** se observă o scădere a acesteia odată cu introducerea PTFE în PBT. Scăderea este mai mică și aproximativ liniară pentru viteza de 0,25 m/s. Pentru celelalte viteze, scăderea are loc până la 10% PTFE, după care are loc o creștere a ratei specifice de uzură.

O tendință asemănătoare se poate observa și în cazul introducerii microsferelor de sticlă în PBT. Are loc o scădere a uzurii ca urmare a creșterii rezistenței la rupere a materialului compozit ranforsat cu 10% MSS, după care, cu creșterea conținutului de microsferă de sticlă, crește și componenta abrazivă a uzurii.

În cazul compozitului hibrid, se observă o tendință de scădere accentuată a ratei specifice de uzură și o micșorare a intervalului de împrăștiere a rezultatelor. Cele două componente, ranforsarea cu 10% MSS și lubrifierea solidă cu 10% PTFE, au un efect cumulativ, obținându-se o rată specifică de uzură mai mică decât în cazul materialelor compozite PBT + MSS sau al amestecurilor polimerice PBT + PTFE.

2.3.2. Concluzii privind parametrii de uzură

Realizarea hărților pe baza unor parametri de uzură diferiți, poate fi utilă pentru evidențierea anumitor procese specifice tribosistemului. De exemplu, dacă utilizatorul este interesat de efectele produse de uzură asupra dimensiunilor contactului, a jocurilor, etc., atunci hărțile pentru intensitatea liniară specifică de uzură pot fi considerate mai relevante pentru compararea comportării tribologice a materialelor. Dacă interesează doar pierderea de material prin uzură, atunci sunt utile hărțile pentru rata specifică de uzură.

I. Intensitatea specifică liniară de uzură

Se observă o creștere destul de mare a intensității specifice liniare de uzură cu introducerea microsferelor de sticlă, respectiv cu aproximativ 65% la un adaos de 10% MSS și cu ~27% la un adaos de 20% MSS.

Aceeași tendință cu a adaosului de 10% MSS se observă și la introducerea a 10% PTFE în PBT, creșterea WI fiind de ~63%.

Singurul material care prezintă o scădere (cu cca. 45%) a intensității specifice liniare de uzură comparativ cu materialul de bază (PBT), este PF5.

Adăugarea unei cantități mai mari de PTFE (15%) nu a avut ca efect decât o creștere nesemnificativă, cu ~3%, a uzurii, comparativ cu uzura PBT-ului neaditivat.

Pentru compozitul hibrid s-a observat o anulare a efectelor materialelor de adaos, intensitatea specifică liniară de uzură fiind aproximativ egală cu a materialului de bază.

II. Rata specifică de uzură

Un adaos de 10% MSS scade rata specifică de uzură cu ~20%. Cu creșterea conținutului de microsferă de sticlă, scăderea W_s este mai mică, cu ~18% față de PBT.

Aceeași tendință se observă și în cazul adaosului de PTFE în PBT. Adaosul de 5% PTFE a produs o scădere importantă (~46%) a ratei specifice de uzură, față de materialul de bază neaditivat. Creșterea cantității de PTFE peste această valoare determină o scădere din ce în ce mai mică a acestui parametru de uzură, cu ~33,3% pentru PF10 și respectiv ~31% pentru PF15, comparativ cu PBT-ul.

Cea mai importantă scădere a ratei specifice de uzură (~57%) față de PBT s-a înregistrat în cazul compozitului hibrid (PBT + 10% MSS + 10% PTFE).

De remarcat și faptul că, pentru aceleași condiții de testare, pentru $F = 5$ N, rata specifică de uzură a PTFE este mai mare de ~100 ori decât cea a PBT-ului și de ~180 ori mai mare decât cea a compozitului hibrid GB10-PF10.

2.4. Metodă proprie de evaluare a uzurii utilizând profilometria 3D

În majoritatea lucrărilor din domeniul uzurii materialelor și în mod particular în cazul tribotesterelor prismă-pe-inel, volumul de material îndepărtat prin uzură se determină prin calcul, în funcție de:

- pierderea de masă (Δm) și densitatea materialului (ρ);
- uzura liniară (Z), înregistrată de tribometrul folosit;
- lățimea urmei de uzură (b), de obicei, măsurată cu diferite mijloace (șublere, micrometre, microscopie de măsurare etc.).

S-a observat că pierderea de masă a materialelor testate este foarte mică (de ordinul zecimilor de miligram) comparativ cu pierderea de masă a PTFE-ului (zeci de grame), pentru aceiași parametri de testare. Deasemenea, în calculele pe baza uzurii liniare sau a lățimii de uzură, de obicei nu se ține cont și de abaterile macrogeometrice (de la planitatea blocului sau de la cilindricitatea inelului) sau de abaterile de poziționare ale celor două elemente ce vin în contact.

S-a realizat o comparație a valorilor volumelor determinate prin primele două metode (în funcție de pierderea de material și în funcție de uzura liniară) și s-au găsit diferențe între cele două volume (tabelul 2.5). Acest fapt a condus la căutarea unei metode mai precise de determinare a volumului urmei de uzură.

O nouă metodă a apărut ca urmare a posibilității de înregistrare prin profilometrie optică 3D a blocurilor din materialele testate. Datele generate de aceasta au fost coordonatele X, Y, Z ale topografiei suprafeței și au putut fi prelucrate în programul MATLAB R2009b. În figura 2.33 este prezentată o suprafață scanată cu ajutorul profilometrului NANOFOCUS μ SCAN din cadrul Facultății de Inginerie Mecanică, Mecatronica și Management a Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava.

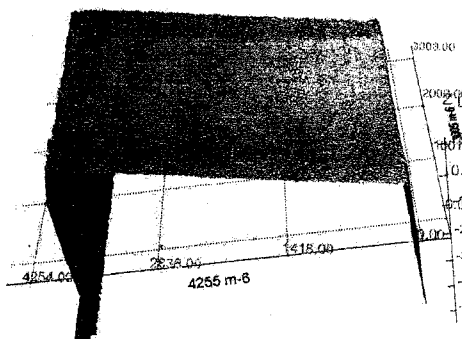


Fig. 2.33. Suprafața scanată a blocului din PF10, după testare la $F = 5 \text{ N}$, $v = 0,75 \text{ m/s}$, $L = 7500 \text{ m}$; Suprafața scanată: $4,25 \text{ mm} \times 3,0 \text{ mm}$; Număr puncte măsurate: 511451

Pentru a extrage aria și volumul urmei de uzură din datele experimentale, trebuie urmăriți următorii pași:

- Eliminarea marginilor din piesa inițială (stare naturală – figura 2.34);
- Limitarea urmei de uzură;
- Calcularea ariei și volumului urmei de uzură.

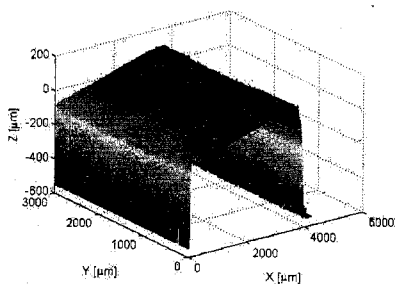


Fig. 2.34. Afișare piesa inițială (stare naturală)

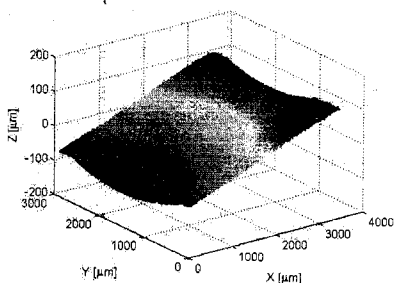


Fig. 2.35. Afișare piesă fără margini

a) Eliminarea marginilor piesei inițiale se poate face manual, cunoscând dimensiunile piesei (fig. 2.35).

b) Pentru limitarea urmei de uzură sunt urmați următorii pași:

b.1) Se aproximează cu un polinom de gradul 10 fiecare secțiune transversală a piesei (fig. 2.36.a)

Determinarea celei mai bune aproximări a unui set de date (x, y) , cu un polinom de ordin n , folosește funcția *polyfit* (biblioteca MATLAB) și se apelează cu una dintre sintaxele:

- $p = \text{polyfit}(x, y, n)$ găsește coeficienții polinomului $p(x)$, de grad n , care se potrivește cu datele de intrare $p(x(i))$, în punctul $y(i)$, iar rezultatul p , este un vector linie, de lungime $n+1$, conținând coeficienții polinomului în ordine descrescătoare a puterilor,

$$p(x) = p_{1x}^n + p_{2x}^{n-1} + \dots + p_{nx} + p_{n+1} \quad (2.3)$$

- $[p, S] = \text{polyfit}(x, y, n)$ restituie coeficienții p și o structură S , pentru a se folosi cu funcția *polyval*, în scopul obținerii erorii estimate;

b.2) Se face calculul curburii polinomului găsit pentru fiecare secțiune a piesei

Acest calcul se realizează pentru a extrage urma de uzură în planul de secțiune (aceasta are o curbă diferită față de marginile piesei – vezi figura 2.36.b).

b.3) Se calculează punctele de minim pentru a determina zona de uzură

Pentru a extrage urma de uzură, se determină cele două minime ale curburii în fiecare secțiune. În aceste minime, urma de uzură se delimitează de suprafața inițială a piesei. Cunoscând aceste minime, se pot elimina marginile piesei, rezultând suprafața urmei de uzură (fig. 2.37).

c) Calculul ariei și volumului urmei de uzură

Pentru calculul ariei și volumului urmei de uzură se aproximează curba urmei de uzură în planul de secțiune găsită cu un polinom de gradul 2 (fig. 2.38).

Determinarea ariei se realizează prin calculul lungimii fiecărei secțiuni a uzurii, apoi acestea se adună și se înmulțesc cu valoarea distanței dintre secțiuni (în cazul de față, 5 μm).

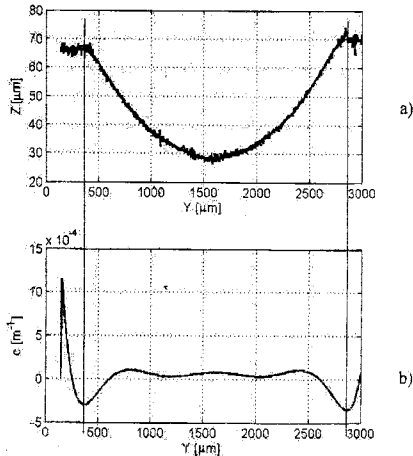


Fig. 2.36. Aproximarea polinomială a unei secțiuni transversale și calculul curburii acesteia

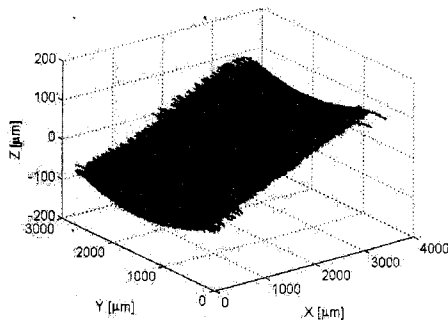


Fig. 2.37. Afișare 3D a zonei de uzură

Toate valorile din calcul fiind exprimate în μm , este necesar ca rezultatul obținut să se împartă la 1.000.000 pentru a returna valoarea ariei în mm^2 .

Calculul volumului se realizează prin determinarea ariei fiecărei secțiuni a uzurii, apoi acestea se adună și se înmulțesc cu 5 (valoarea distanței dintre secțiuni, în μm) și se împart la 1.000.000.000 pentru a returna valoarea volumului, în mm^3 . Pentru determinarea ariei fiecărei secțiuni a urmei de uzură (fig. 2.39), din aria trapezoidală generată de vârfurile parabolei se scade aria de sub parabolă (calculată cu funcția quad).

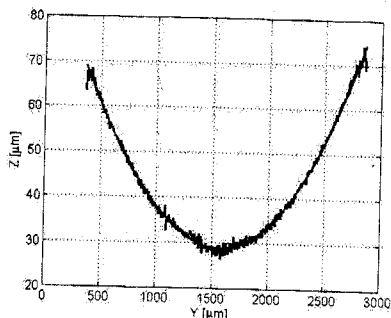


Fig. 2.38. Zona utilă (urma de uzură) și aproximarea acesteia printr-un polinom de gradul 2

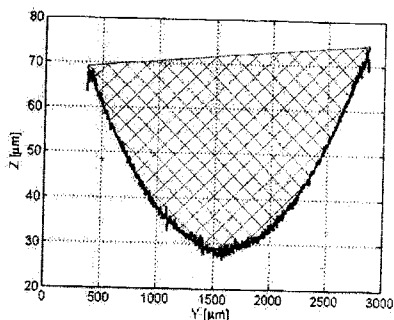


Fig. 2.39. Suprafața utilă pentru calculul volumului de uzură

Pseudocod pentru programul de măsurare a urmei de uzură

1. Citire date din fișier;
 - 1.1 redimensionare matrice
 - 1.2 transformare valori z (din coloana - în matrice)
2. Afisare figura initiala (fig. 2.34)
3. Eliminare margini (fig. 2.35)
4. Program principal pentru determinarea zonei de uzura, calculul s-a realizat pe secțiuni transversale departate la pasul de 5 μm

Pentru fiecare secțiune (for):

- 4.1 aproximarea polinomiala (de gradul 10) a fiecărei secțiuni transversale ($P(1)*x^{10} + P(2)*x^9 + \dots$) (fig. 2.36.a)
- 4.2 calculul curburii (1/raza) polinomului găsit conform ecuației:

$$c = \frac{\dot{x} \cdot \ddot{y} - \dot{y} \cdot \ddot{x}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}$$

- 4.3 calcul punctelor de minim pentru a determina zona de uzura (fig. 2.36.b)
- 4.4 aproximarea polinomiala (de gradul 2) a fiecărei secțiuni utile (fig. 2.38)
- 4.5 calcul lungime secțiune utila - pentru a determina aria uzurii.
- 4.6 calcul arie utila - $ar_{sect} = ar_{tr} - ar$, unde:

ar_{tr} este aria trapezoidală; $ar = \int_a^b f(x)dx$; în Matlab s-a utilizat

funcția `quad()` - algoritm de quadratura ce utilizeaza regula Simpson;

End

5. Afisarea rezultatelor: aria uzurii si a volumului:

Aria = 8.5972 mm^2 Volumul_total = 0.1953 mm^3

În tabelul 2.5 se prezintă câteva valori ale volumului de uzură determinate prin această metodă, comparativ cu valori determinate prin calcul.

Tabelul 2.5. Comparatie volum uzură determinat prin diferite metode pentru $F = 5 \text{ N}$, $L = 7500 \text{ m}$

Material	Viteza [m/s]	$V_{\text{geometric}}$ [mm ³]	$V_{\text{pierdere masă}}$ [mm ³]	$V_{\text{pierdere masă}} - V_{\text{geometric}}$		V_{Matlab} [mm ³]
				[mm ³]	[%]	
PBT	0,25	0,0792	0,1010	0,0218	21,58	0,0899
PF5	0,50	0,0420	0,0498	0,0078	15,66	0,0478
PF10	0,75	0,1052	0,1992	0,0940	47,19	0,1953
PF15	0,25	0,0344	0,0986	0,0642	65,11	0,0781
	0,50	0,0268	0,0490	0,0222	45,31	0,0491
	0,75	0,0232	0,0741	0,0509	68,69	0,0524
GB10-PF10	0,50	0,1260	0,1662	0,0402	24,19	0,1589
	0,75	0,1840	0,2140	0,0300	14,02	0,2001
PTFE	0,25	20,3536	20,3687	0,0151	0,07	-
	0,50	21,3260	21,4747	0,1487	0,69	-
	0,75	15,4804	16,6359	1,1555	6,95	-

Volumul geometric al urmei de uzură este calculat cu relația:

$$V_{\text{geometric}} = \left(\frac{\pi \cdot R^2 \cdot \alpha}{360} - R^2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right) \cdot l \quad (2.4)$$

unde (fig. 2.40): $R = 35 \text{ mm}$ - raza inelului metalic; α - unghiul la vârf al sectorului de cerc determinat de pătrunderea inelului de metal în blocul polimeric (Z), în radiani,

$$\alpha = 2 \cdot \arccos \left(\frac{R - Z}{R} \right) \quad (2.5)$$

l - lățimea blocului (4 mm).

Volumul calculat al materialului pierdut prin uzură s-a determinat cu relația:

$$V_{\text{pierdere masă}} = \frac{\Delta m}{\rho} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (2.6)$$

unde Δm [g] este pierderea de masă, determinată ca fiind diferența dintre masa inițială și masa finală a blocului (după efectuarea testului), ρ [g/mm³] este densitatea materialului blocului.

Pentru materialele cu pierdere mare prin uzură (în cazul de față PTFE) testate în aceleași condiții, chiar dacă diferența dintre volumele de uzură determinate prin cele două metode este relativ mare comparativ cu materialele ce au pierdere mică prin uzură (PBT și materiale pe bază de PBT), totuși, procentual, diferă în limite acceptabile (max. 7%), motiv pentru care se poate utiliza orice parametru de uzură (intensitatea lineară specifică de uzură sau rata specifică de uzură) pentru studii în domeniul tribologic.

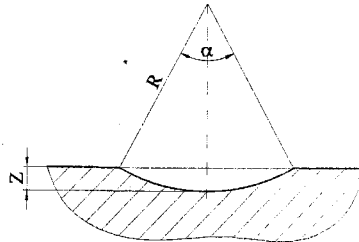


Fig. 2.40. Schemă calcul volum geometric

În cazul materialelor testate pe tribotesterul prismă-pe inel în cadrul acestui studiu, se observă o tendință inversă, respectiv o diferență dintre volumele de uzură relativ mică valoric și diferență procentuală foarte mare (chiar și peste 50%) datorită tocmai pierderilor foarte mici prin uzură, motiv pentru care s-a impus utilizarea parametrilor de uzură diferiți pentru a evidenția procesele specifice tribosistemului atunci când se compară materialele din punct de vedere al comportării tribologice. Din tabelul 2.5 reiese faptul că volumul urmei de uzură, determinat prin metoda proprie propusă pe baza profilometriei optice, se află situat între cele două volume $V_{\text{geometric}} < V_{\text{Matlab}} \leq V_{\text{pierdere masă}}$, cu diferențe relativ mari față de volumul determinat pe baza uzurii liniare (în special pentru amestecurile polimerice PBT + PTFE) și cu valori foarte apropiate de volumul determinat în funcție de pierderea de material. Această inegalitate se explică prin faptul că uzura liniară include dilatarea și deformația elasto-plastică și nu ține cont nici de abaterea de la planitate a blocului sau abaterea de la cilindricitate a inelului și nici de abaterile de poziționare ale blocului față de inel, iar în volumul urmei de uzură calculat cu ajutorul programului realizat în Matlab intră și revenirea elastică, iar investigarea blocului cu profilometrul optic s-a realizat la temperatura camerei.

Concluzie. Programul realizat pentru evaluarea urmei de uzură utilizând profilometria optică 3D este un instrument util pentru determinarea cât mai exactă a volumului urmei de uzură pentru tribotesterele prismă-pe-inel, în cazul testării materialelor polimerice sau a materialelor compozite pe bază de polimeri, la care pierderea de masă este foarte mică, fără a fi influențat de abaterile macrogeometrice și/sau abaterile de poziționare ale celor două suprafețe ce vin în contact. El va putea fi utilizat în continuare pentru a determina proporțiile în care intervine fiecare proces (pierderea de material, deformarea elasto-plastică, dilatări și contracții etc.) asupra deteriorărilor provocate de frecare.

2.5. Corelație între emisia acustică și caracteristicile tribologice pentru materialele testate

2.5.1. Influența parametrilor de testare asupra emisie acustice

Pentru studiul influenței parametrilor de testare asupra emisie acustice s-au folosit valorile măsurate pentru materialul de bază, PBT. Din figura 2.41 se observă că emisia acustică crește aproape liniar cu mărirea distanței de alunecare. Creșterea forței normale de încărcare modifică puțin amplitudinea emisie acustice (în sensul creșterii acesteia). Creșterea cu sarcina aplicată înseamnă, calitativ, acumularea deteriorărilor în contact (deformări, detașări de material). Contrar literaturii studiate [18], care precizează viteza mare de alunecare

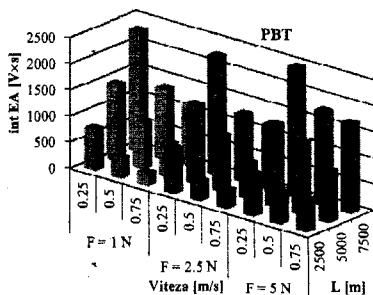


Fig. 2.41. Influența parametrilor de testare asupra intEA, pentru PBT

printre factorii ce cresc amplitudinea emisiei acustice, pentru PBT se remarcă o scădere a acesteia odată cu creșterea vitezei de alunecare, pentru toate sarcinile aplicate.

2.5.2. Influența materialelor de adaos asupra emisiei acustice

Din figura 2.42.a se observă o creștere a emisiei acustice cu creșterea conținutului de microsfere de sticlă. Aceasta se poate explica prin creșterea numărului de evenimente care implică MSS: spargeri ale acestora, frecări interne în compozit, însoțite de deformări elasto-plastice, abraziune pe suprafața dură a inelului metalic, fixări ale fragmentelor desprinse în microtopografie, aglomerări (fig. 2.43).

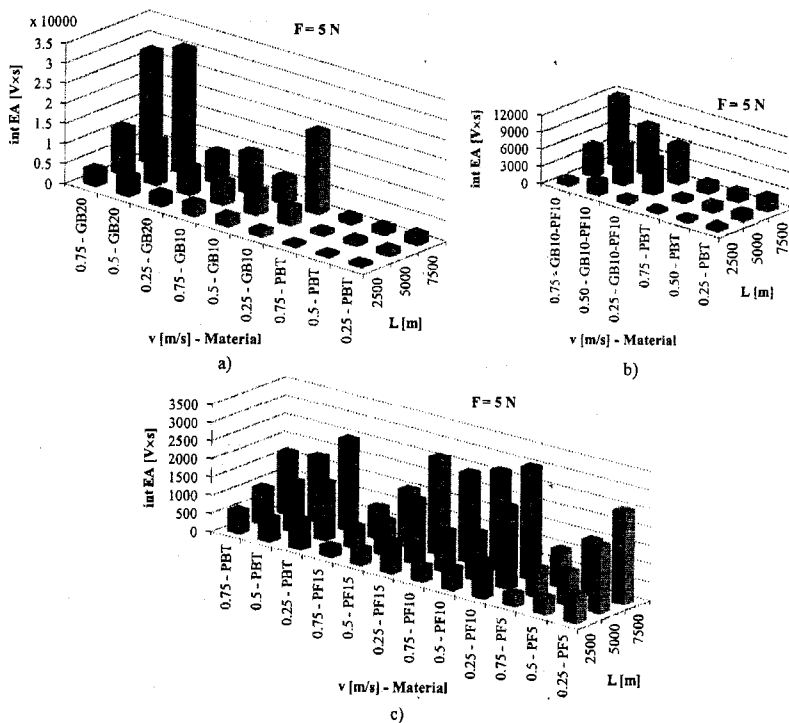


Fig. 2.42. Influența materialelor de adaos asupra emisiei acustice, pentru $F = 5\text{ N}$

Adaosul de până la 15% PTFE în PBT nu are o influență semnificativă asupra amplitudinii emisiei acustice (fig. 2.42.c). Se observă că numai pentru adaosul de 5% PTFE se obține o scădere a emisiei acustice pentru toți parametrii de testare. Această scădere este pusă pe seama unei suprafețe (inițiale și finale) mai netede, cu o structură izotropă și mai fină, a unei uzuri adezive și a frecării în prezența lubrifianțului solid. O tendință similară, dar mai slabă, se observă pentru adaosul de 15% PTFE, cu excepția vitezei de 0,25 m/s. Pentru un adaos de 10% PTFE se remarcă o tendință contrară așteptărilor, respectiv o creștere a emisiei

acustice pentru distanțe de alunecare mari și viteze mici, pusă pe seama dispersiei neuniforme a acestui material.

Pentru compozitul hibrid GB10-PF10 (fig. 2.42.b și 2.43.d) se observă o tendință a emisiei acustice similară compozitului cu 10% MSS, cu o ușoară scădere a amplitudinii acesteia ca urmare a adaosului de lubrifiant solid (10% PTFE).

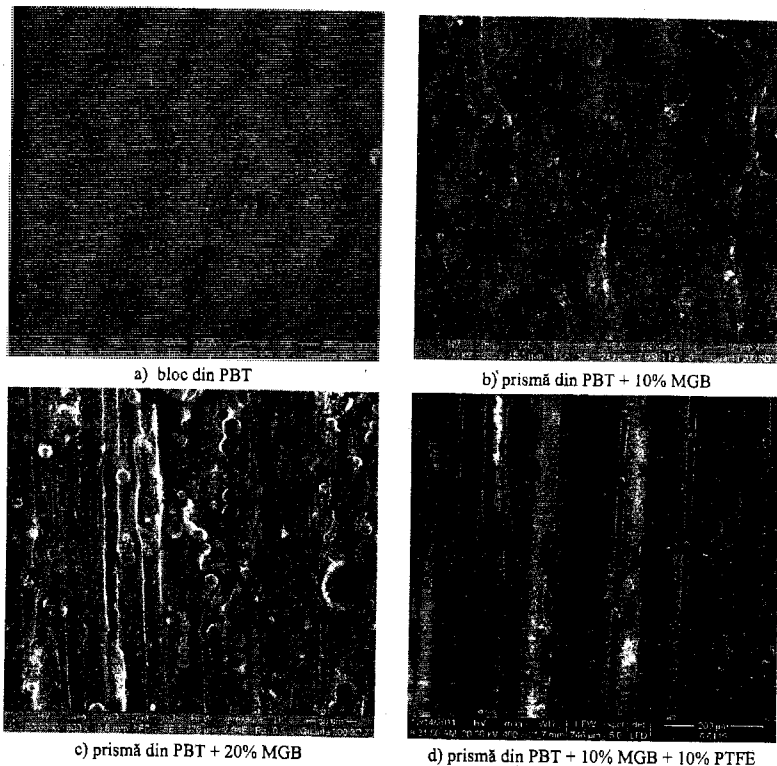


Fig. 2.43. Imagini SEM ale blocurilor polimerice după testare în aceleași condiții:
 $F = 5 \text{ N}$, $v = 0,75 \text{ m/s}$, $L = 7500 \text{ m}$

2.5.3. Corelație între emisia acustică și proprietățile mecanice

Fiecare material (care s-a frecat de suprafețe metalice identice, în aceleași condiții de testare) este caracterizat printr-un anumit nivel de stabilizare a semnalului emisiei acustice, deoarece diferă din punct de vedere al proprietăților mecanice.

Dacă pentru materialele polimerice s-a obținut o concordanță între nivelul emisiei acustice în regim stabilizat și rezistența la rupere σ_r [27], în sensul creșterii EA cu creșterea σ_r [MPa], pentru materialele compozite pe bază de PBT acest lucru nu este valabil, respectiv se remarcă o tendință de creștere a nivelului emisiei acustice (determinat prin int EA) cu scăderea limitei de rupere, pentru fiecare clasă de materiale pe bază de PBT testate. Mai

apare o concordanță între nivelul EA și modulul de elasticitate longitudinal E, respectiv nivelul EA crește cu mărirea modului lui Young (tabelul 2.6).

Tabelul 2.6. Corelații între emisia acustică și limita la rupere, respectiv modulul de elasticitate longitudinal pentru materialele testate (vezi și capitolul 3)

Material		int EA* [V·s]	σ_r [N/mm ²]	E [N/mm ²]
Compozite PBT + MSS	PBT	1700,8	41,571	1923
	GB10	9936	40,265	2358
	GB20	27846	36,543	2849
Amestecuri polimerice PBT+PTFE	PF5	1013,3	46,408	1826
	PF15	1127,0	43,286	1867
	PBT	1700,8	41,571	1923
	PF10	2425,8	36,971	2202
Compozit hibrid	PBT	1700,8	41,571	1923
	GB10-PF10	11939	35,335	2144

* Valori determinate pentru testele realizate în condițiile: F = 5 N, v = 0,75 m/s, L = 7500 m

Pornind de la faptul că semnalul emisie acustice este generat prin relaxarea undelor de tensiuni mecanice create prin deformarea materialului în stratul superficial, s-a găsit și o corelație între nivelul EA și energia de rupere, în sensul creșterii acesteia cu scăderea energiei de rupere (vezi tabelul 2.7). Această corelație poate fi explicată prin faptul că prin scăderea energiei de rupere, posibilitatea desprinderii de particule de pe suprafața materialului crește, apărând o uzură abrazivă, însoțită și de o deformare prin micro-așchiere (fig. 2.10), acesta fiind un factor important în creșterea amplitudinii impulsurilor emisie acustice.

Tabelul 2.7. Corelații între emisia acustică și energia de rupere pentru materialele testate

	Materiale						
	Compozit hibrid		Compozite PBT + MSS		Amestecuri polimerice PBT+PTFE		
	GB10-PF10	PBT	GB10	GB20	PF5	PF15	PF10
int EA* [V·s]	11939	1700,8	9936	27846	1013,3	1127,0	2425,8
	← crește		→ crește		→ crește		
Energia de rupere [N·m]	1,982	17,665	2,207	0,701	6,868	5,065	1,824
	← scade		→ scade		→ scade		

* Valori determinate pentru testele realizate în condițiile: F = 5 N, v = 0,75 m/s, L = 7500 m (fig. 2.67)

2.5.4. Corelație între emisia acustică și volumul de material uzat

Pornind de la ipoteza că desprinderea fiecărei particule este o sursă de emisie acustică, s-a găsit și pentru materialele pe bază de PBT o corelație între volumul de uzură al blocului și tensiunea semnalului EA integrată pe perioada de timp testată. Tipul linear de corelație, specific frecării plastic-metal, s-a dovedit valabil și pentru frecarea material compozit-metal. În figura 2.44 sunt prezentate rezultatele obținute pentru cele trei clase de materiale pe bază

de PBT, pentru toți parametrii de testare și arată că *int EA* crește liniar cu creșterea volumului de uzură. Creșterea este mai rapidă pentru materialele compozite cu microsferă de sticlă, la care mai apare și desprinderea materialului de adaos în procesul abraziv.

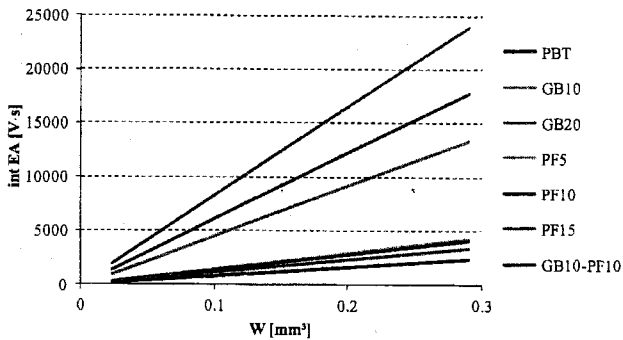


Fig. 2.44. Corelația dintre integrala EA și volumul de uzură pentru materialele testate

Tabelul 2.8. Valorile constantei $k_{(W,EA)}$ pentru materialele testate

Materiale testate	$k_{(W,EA)}$ [V·s/mm ³]	Materiale din literatură [27]	$k_{(W,EA)}$ [V·s/mm ³]
PBT	$0,83 \times 10^4$	POM	$1,32 \times 10^6$
GB10	$4,51 \times 10^4$	PA 66	$4,66 \times 10^4$
GB20	$8,25 \times 10^4$	Torlon (PAI)	$6,17 \times 10^4$
PF5	$1,47 \times 10^4$	PP	$2,89 \times 10^4$
PF10	$1,42 \times 10^4$	PTFE	26,15
PF15	$1,17 \times 10^4$	HDPE	$3,04 \times 10^3$
GB10-PF10	$6,13 \times 10^4$	PVC	$4,05 \times 10^4$

Valorile constantei de proporționalitate pentru materialele testate sunt prezentate în tabelul 2.8 și au fost calculate cu relația:

$$k_{(W,EA)} = \frac{\text{int EA}}{W} = \frac{\int EA \cdot dt}{W} \quad [\text{V} \cdot \text{s} / \text{mm}^3]. \quad (2.7)$$

2.5.5. Corelație între emisiile acustice și frecare

În figura 2.45 sunt prezentate variațiile tensiunii emisiilor acustice și ale coeficientului de frecare pentru cele trei clase de materiale pe bază de PBT testate în aceleași condiții.

Se observă că tendințele sunt comparabile. Totuși, apar vârfuri ale tensiunii emisiilor acustice, generate în principal de desprinderea de particule de pe suprafața blocurilor, care nu se regăsesc și în creșterea locală a coeficientului de frecare, așa cum era de așteptat și invers, apariția vârfurilor pentru graficele coeficientului de frecare, fără salturile așteptate din partea tensiunii emisiilor acustice.

La materialele compozite pe bază de PBT testate nu s-a putut găsi nici o corelație între coeficientul de frecare și tensiunea emisiilor acustice, în ciuda tendințelor comparabile.

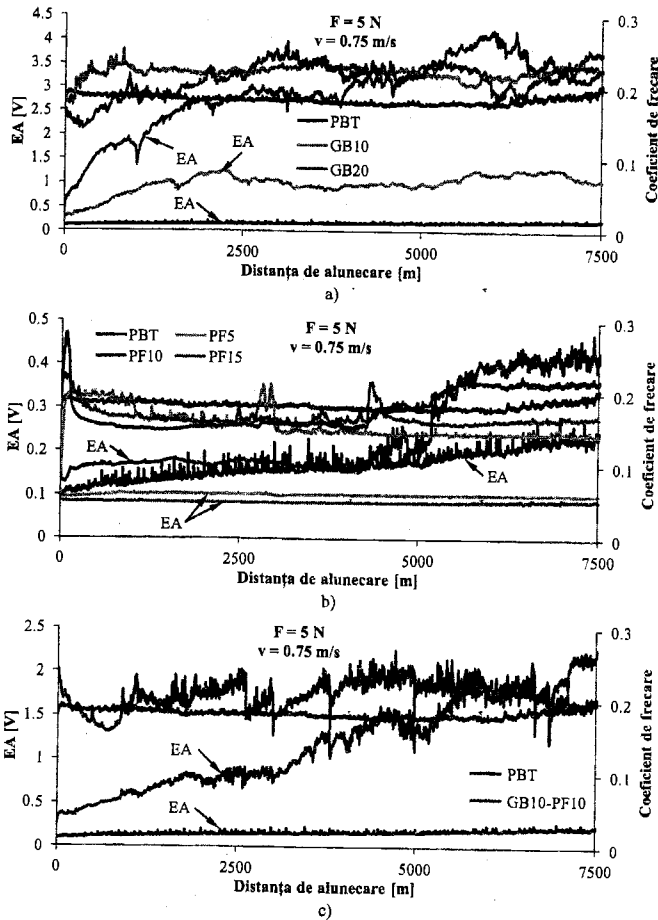


Fig. 2.45. Corelație între emisia acustică și coeficientul de frecare în timp, pentru materialele testate ($F = 5 \text{ N}$, $v = 0,75 \text{ m/s}$, $L = 7500 \text{ m}$)

Pentru materiale metalice [221] și plastice [27], s-a găsit o corelare între emisia acustică și lucrul mecanic de frecare. Pornind de la aceste sugestii de corelare, s-a găsit și pentru materialele compozite pe bază de PBT testate o corespondență aproximativ liniară între integrala în timp a tensiunii emisie acustice și lucrul mecanic de frecare (fig. 2.46), cu o constantă de proporționalitate ce depinde de material, respectiv de proprietățile lui mecanice.

Lucrul mecanic de frecare a fost calculat cu relația:

$$L_f = \int_0^L F_f \cdot dL \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (2.8)$$

și reprezintă variația forței de frecare F_f integrată pe distanța de alunecare L .

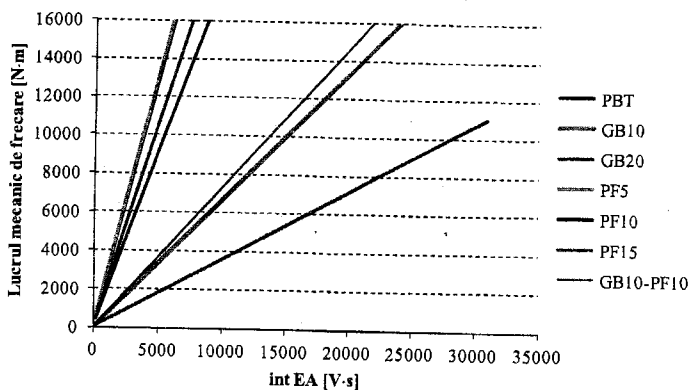


Fig. 2.46. Corelația dintre lucrul mecanic de frecare și integrala EA pentru materialele testate

Valorile constantei de proporționalitate pentru materialele testate sunt prezentate în tabelul 2.9 și au fost calculate cu relația:

$$k_{(L_r,EA)} = \frac{L_r}{\text{int EA}} \quad [\text{N}\cdot\text{m}/\text{V}\cdot\text{s}] \quad (2.9)$$

Tabelul 2.9. Valorile constantei $k_{(L_r,EA)}$ pentru materialele testate

Materiale testate	PBT	GB10	GB20	PF5	PF10	PF15	GB10-PF10
$k_{(L_r,EA)}$	2,5922	0,6654	0,3559	2,6453	1,8276	2,1276	0,7322

Concluzii

Există o concordanță între nivelul emisie acustice în regim stabilizat și limita de rupere, modulul de elasticitate longitudinal, respectiv energia de rupere, pentru cele trei clase de materiale pe bază de PBT testate.

S-a găsit o dependență liniară între volumul de uzură și tensiunea semnalului emisie acustice integrată pe perioada de timp de testare, precum și valorile constantelor de proporționalitate pentru toate materialele compozite testate.

Deși nu a fost găsită o corelație între emisia acustică și coeficientul de frecare, totuși lucrul mecanic de frecare este proporțional cu integrala tensiunii efective a emisie acustice, fiind determinate și valorile constantelor de proporționalitate pentru materialele pe bază de PBT testate.

Aceste relații se pot dovedi importante în viitor pentru predicția comportamentului tribologic al tribosistemelor reale cu ajutorul monitorizării semnalului emisie acustice.

CAPITOLUL 3

REZULTATE PRIVIND CARACTERISTICILE MECANICE ALE MATERIALELOR ELABORATE PE BAZĂ DE PBT

3.1. Introducere

Materialele termoplastice sunt vâsco-elastice, ceea ce înseamnă că proprietățile lor mecanice reflectă atât caracteristicile lichidelor vâscoase, cât și a solidelor elastice [57], [132], [160]. Deci, când un material termoplastic este sollicitat, el răspunde printr-o curgere vâscoasă (care disipează energie) și printr-o deplasare elastică (care înmagazinează energie). Proprietățile materialelor vâscoelastice sunt dependente de timp, temperatură și viteza de deformare [50], [59], [69], [235]. Totuși, testul convențional de tracțiune este des utilizat pentru a descrie proprietățile mecanice pe termen scurt ale materialelor plastice [57] și ale compozitelor lor [80], [160], [316], [414], [425]. Informația obținută din aceste teste poate fi folosită doar pentru o selectare inițială a materialului. Este adecvat și de dorit să se asigure date de proiectare care se obțin de obicei din testele pe termen lung, dar acestea sunt mari consumatoare de timp și de resurse [209], [235].

La deformații relative mici există un domeniu elastic, în timp ce pentru deformații relative mari există o relație neliniară între tensiune și deformație și o componentă permanentă a acesteia din urmă [132]. În absența oricărei informații particulare pentru un material plastic anume, deformațiile din proiectare ar trebui în mod normal limitate la 1% [50], [80], [421]. Valori mai mici (-0,5%) sunt recomandate pentru materiale termoplasticele mai casante cum ar fi poliacrilicele, polistirenul, iar valori de 0,2...0,3% ar trebui folosite ca limite la materiale plastice termorigide. Într-o gamă de mărci pentru un material plastic, pot exista diferențe semnificative ale proprietăților mecanice. O marcă de material selectată pentru anumite caracteristici dorite (de exemplu, rezistență mare la impact) are valori mai reduse pentru alte proprietăți ale materialului (de exemplu, rezistența la tracțiune) [80], [402], [403], [432].

Prin însăși natura și structura materialelor plastice, modulul de elasticitate de valoare mare este asociat cu o ductilitate scăzută, și îmbunătățirea unui atribut se poate face pe baza deteriorării celuilalt. Se observă o tendință pentru aproape toate materialele ca un modul de elasticitate mare să fie „însoțit” de o ductilitate redusă și invers [50], [80].

Proprietățile mecanice generale au fost introduse pentru a facilita compararea cu alte clase de materiale și pentru a putea face referire la standarde și metode de măsurare a acestor proprietăți, cum ar fi graficele tensiune – deformație etc. Chiar și procesul de prelucrare își pune amprenta asupra comportării mecanice a plasticelor; o piesă, chiar dimensional identică nu se va comporta la fel cu epruveta, dacă nu s-a obținut în aceleași condiții [57].

3.2. Rezultatele testelor la tracțiune pentru materialele studiate

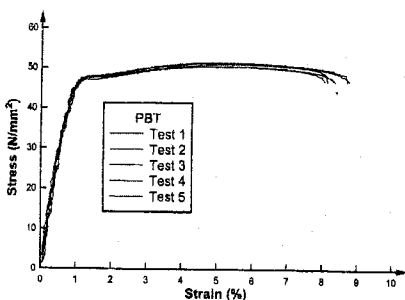
Încercările la tracțiune s-au realizat conform SR EN ISO 527-2 [426] cu ajutorul mașinii TESTOMETRIC M350 - 5AT, cu o celulă de forță de 5 kN, din cadrul „Laboratorului de Cercetare Materiale Polimerice” al Facultății de Mecanică din Galați.

Scopul acestora a fost acela de a obține curbe tensiune – deformație, care să poată fi folosite ulterior (vezi capitolul 4) ca model de material în modelarea cu element finit și determinarea unor eventuale corelații între proprietățile mecanice și cele tribologice ale materialelor pe bază de PBT testate.

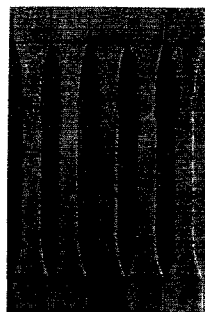
Viteza de testare a fost de 5 mm/min. Distanța inițială între semnele de marcare a fost de 115 mm. Calculul tensiunii s-a realizat utilizând aria secțiunii transversale inițiale a fiecărei epruvete, pentru fiecare moment t al testului.

Standardele SR EN ISO 527-2 [426] și ASTM D638 [388], [414] definesc epruvetele recomandate pentru diverse materiale pe bază de materiale polimerice, obținute prin matrițare, prin injecție și prin extrudare. S-a ales epruveta-halteră normală, care are o lungime minimă de 150 mm, o lățime la partea cea mai lată de 20 mm și o lățime pe partea paralelă de 10 mm. Grosimea preferată este de 4 mm.

Pentru PBT, s-a obținut un palier de curgere tipic pentru polimerii termoplastici (fig. 3.1). Acest polimer poate fi inclus în grupa materialelor tenace cu limita de curgere mai mică decât tensiunea de rupere, ținând seama de clasificarea făcută de Brown [57]: materiale tenace cu limita de curgere mai mare decât limita de rupere, materiale tenace cu limita de curgere mai mică decât limita de rupere, materiale casante și materiale tenace cu aceeași limită de curgere și de rupere.



a) curbe tensiune – deformație pentru cinci teste



b) imagini ale epruvetelor după testare

Fig. 3.1. Teste la tracțiune pentru epruvete din PBT

Valorile caracteristicilor mecanice s-au obținut prin medierea valorilor din cel puțin cinci teste considerate acceptabile (fără valori aberante față de literatura consultată și fără a fi relativ mult împrăștiate [57], [425]).

Pentru toate materialele, pe baza datelor înregistrate pentru fiecare test în parte, s-au determinat cu ajutorul programului winTest™ Analysis [435] al mașinii de încercat: modulul de elasticitate E , limita de rupere σ_r , alungirea la rupere ϵ_r și energia de rupere (tabelul 3.1) ce reprezintă lucrul mecanic efectuat sau energia absorbită de epruvetă pentru a determina ruperea acesteia.

Tabelul 3.1. Valorile medii ale proprietăților mecanice determinate pentru materialele testate

Material Proprietate	PBT	GB10	GB20	PF5	PF10	PF15	GB10-PF10
Modul de elasticitate E [N/mm ²]	1923	2358	2848	1826	2202	1867	2144
Limita la rupere σ_r [N/mm ²]	41,571	40,265	36,543	46,408	36,971	43,286	35,335
Alungire la rupere ϵ_r [mm]	9,404	2,609	0,763	5,106	2,471	4,124	2,374
Energie de rupere [N·m]	17,665	2,207	0,701	6,868	1,824	5,065	1,982

3.3. Sinteza rezultatelor experimentale

S-au luat în discuție valorile medii și intervalele de împrăștiere pentru fiecare clasă de materiale testate și s-au comparat cu materialul de bază (PBT).

I. Compozite PBT + MSS

Analizând graficele din figura 3.2, se observă următoarele:

- modulul de elasticitate al acestor compozitelor cu matrice de PBT crește aproape liniar cu concentrația masică de microsferă de sticlă;
- limita de rupere pentru compozitul cu 10% MSS este foarte apropiată de cea a polimerului, dar la 20% GB, scade cu ~12% din valoarea determinată pentru polimer;

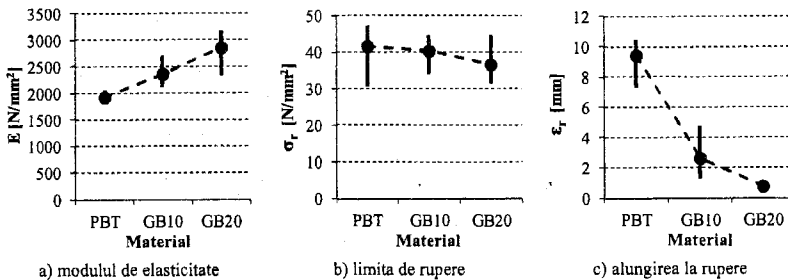


Fig. 3.4. Influența concentrației masice a microsferelor de sticlă asupra proprietăților mecanice

- alungirea la rupere scade cu ~72% pentru PBT + 10% MSS și cu aproape 92% pentru compozitul cu 20% MSS, comparativ cu PBT.

Analizând curbele la tracțiune ale materialelor compozite PBT + MSS, se observă că au o formă tipică pentru materiale cu rupere fragilă (fig. 3.3). În plus, aceste materiale compozite testate au deformații mici la rupere (tabel 3.1), iar epruveta nu prezintă gătuire.

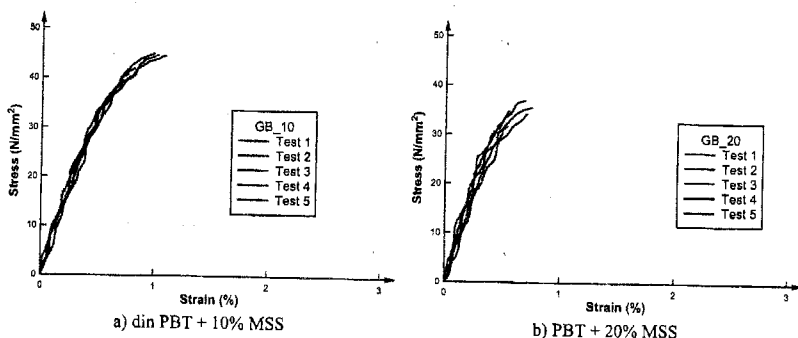


Fig. 3.3. Teste la tracțiune pentru epruvete

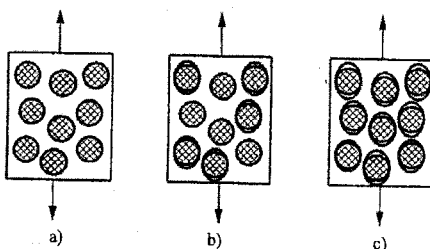


Fig. 3.4. Modele de distrugere a interfeței în compozite polimerice cu particule dure [234]

Medadd și Fisa [234] au propus un model de rupere la tracțiune care se dovedește, calitativ, aplicabil și la compozitele PBT + MSS. Din figura 3.4 se observă că ruperea la tracțiune a unui compozit cu MSS depinde foarte mult de interfața dintre matricea polimerică și microsferile de sticlă:

- interfață rezistentă, care nu se distruge la sollicitare (ruperea apare inițial și se dezvoltă în matrice);
- interfață parțial distrusă la sollicitare, de obicei dependentă de modulul de elasticitate, de fracția volumică a materialului de adaos fără interfață distrusă și fracția volumică a materialului de adaos cu interfață distrusă;
- interfață slabă din punct de vedere al menținerii legăturii între matrice și particulele dure.

Pentru compozitele analizate, procentul de PA de 1%, deși foarte mic, poate influența rezistența interfeței, având o ductilitate și o aderență mai mari decât a PBT.

Analiza imaginilor SEM arată particularități ale ruperii acestor materiale. Secțiunea de rupere are două zone: la marginea epruvetei apare o rupere ductilă, iar spre centrul acesteia ruperea are caracter fragil (fig. 3.5). Pentru compozitul PBT + 20% MSS, matricea a suferit o deformare plastică mai mică și polimerul dintre microsferulele de sticlă a cedat repede, fără alungiri mari, așa cum se vede la compozitul cu doar 10% MSS.

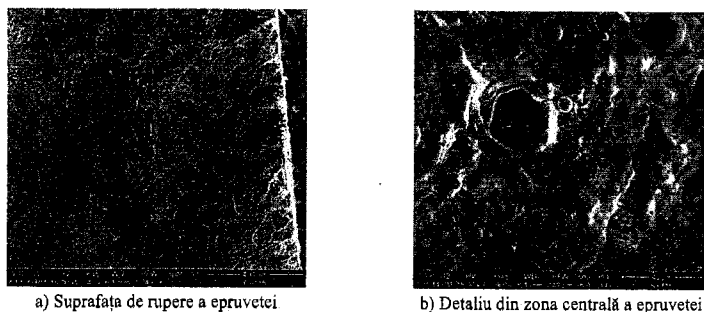


Fig. 3.5. Aspecte tipice ale ruperii compozitului PBT + 10% MSS

II. Pentru amestecurile polimerice PBT + PTFE (fig. 3.6) s-a constatat:

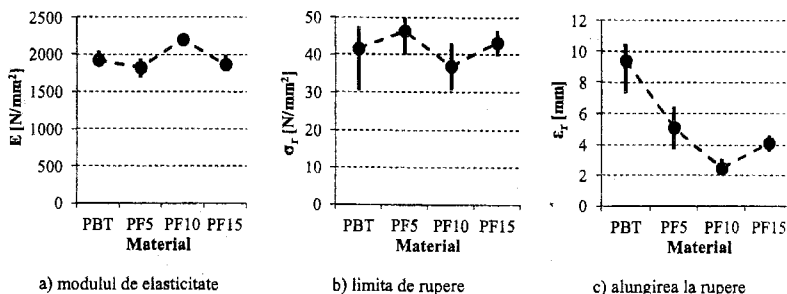


Fig. 3.6. Influența concentrației masice a PTFE asupra proprietăților mecanice

- adăugarea de 5% și 15% PTFE nu influențează decât foarte puțin modulul de elasticitate (are o ușoară tendință de scădere, cu mai puțin de 5%);
- alungirea la rupere scade cu peste 50% pentru toate amestecurile comparativ cu cea obținută pentru PBT;
- limita de rupere a scade cu ~11% doar pentru amestecul de PBT + 10% PTFE, pentru celelalte două amestecuri s-a obținut o ușoară creștere a acestei caracteristici.

Contrar așteptărilor, curbele la tracțiune ale amestecurilor polimerice PBT + PTFE au o formă tipică pentru materiale cu rupere fragilă (fig. 3.7.a, b și c), cu deformații mici la rupere (tabel 3.1) și epruveta fără gătuire după testare (fig. 3.7.d).

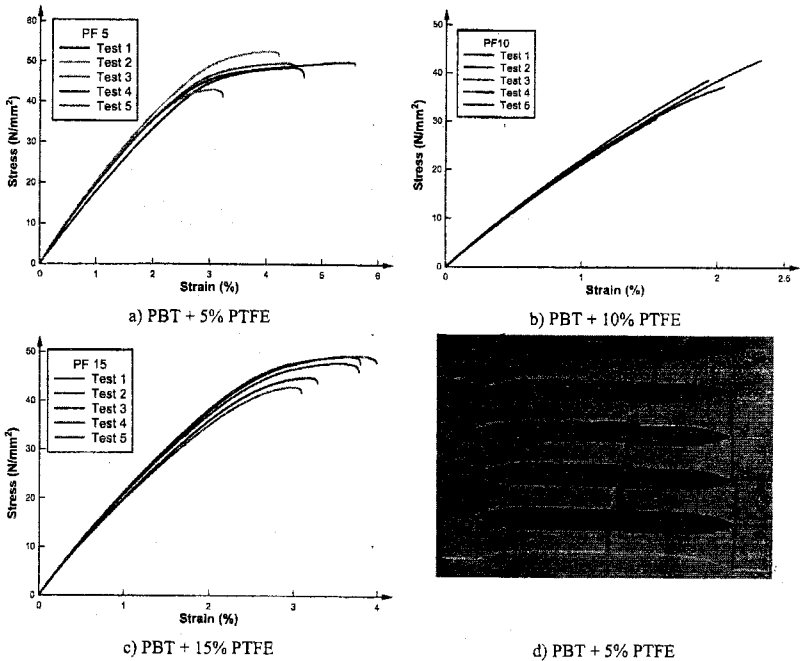


Fig. 3.12. Curbe caracteristice tensiune - deformație la tracțiune și imagine a epruvetelor după testare

III. Pentru compozitul hibrid, PBT + 10% MSS + 10% PTFE (fig. 3.8) s-au

constatat:

- modulul de elasticitate a crescut cu ~12% față de modulul de elasticitate al PBT, mult mai puțin decât la compozitul cu doar 10% MSS, fără PFTE (creștere cu ~23% față de materialul de bază);

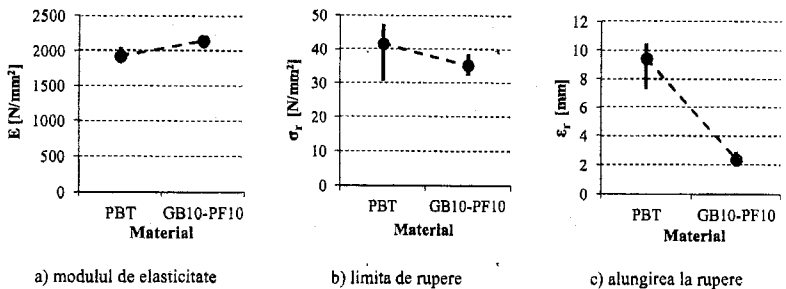
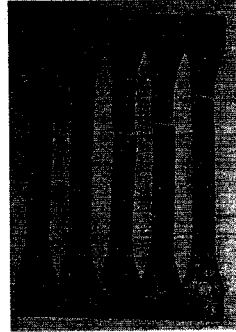
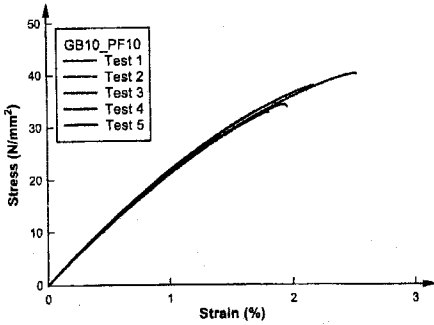


Fig. 3.8. Influența adaosului de 10% microsferă de sticlă și 10% PTFE asupra proprietăților mecanice



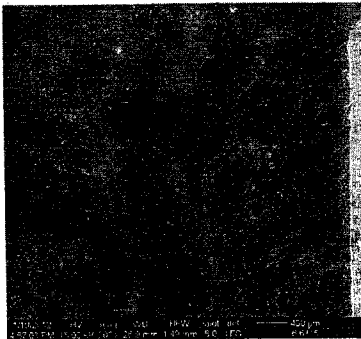
a) curbe tensiune – deformație pentru cinci teste

b) imagini ale epruvetelor după testare

Fig. 3.9. Teste la tracțiune pentru epruvete din PBT + 10% MSS + 10% PTFE

- limita de rupere și alungirea la rupere au scăzut foarte mult, atât față de compozitul cu 10% MSS (GB10), cât și față de amestecul polimeric cu 10% PTFE (PF10), efectele de fragilizare ale celor două adaosuri cumulându-se.

PTFE din compozitul hibrid se alungește, fiind probabil primul care se deformează (are cel mai mic modul și cea mai mică limită de rupere dintre materialele participante); dar "tragerea" PTFE face ca fibrele și "fuioarele" din acest polimer (fig. 3.10) să-și modifice rezistența la rupere, ceea ce ar explica limita de rupere mai ridicată la concentrațiile de 5% și 15% PTFE.



a) Rupere ductilă spre marginea epruvetei și rupere fragilă spre centrul acesteia



b) Detaliu al zonei de rupere ductilă, cu fibre trase de PTFE; acestea au cedat după ce a cedat PBT

Fig. 3.10. Aspecte tipice ale rupei compozitului hibrid PBT + 10% MSS + 10% PTFE

Concluzia acestor teste este că acest polimer se recomandă pentru aditivare dacă se cere un modul de elasticitate mai ridicat, acesta obținându-se prin aditivare cu microsferă de sticlă - ranforsant dur, și nu prin amestecare cu un polimer ca PTFE.

CAPITOLUL 4

MODELAREA CU ELEMENTE FINITE A CONTACTULUI CONCENTRAT ELASTO-PLASTIC

4.1. Modelul pentru sistemul bloc pe inel, cu frecare

Pentru rezolvarea problemei modelării contactului prismă pe inel, cu frecare, s-a utilizat programul COSMOS/M versiunea 2.9 [394].

Scopul urmărit în această lucrare este de a evidenția comportarea PBT-ului la uzura de contact. Modelarea cu elemente finite își propune evaluarea stării de tensiuni și deformații din zona de contact și extinderea acestei analize în diferite situații de solicitare mecanică.

Modelul cu elemente finite este prezentat în figura 4.1.

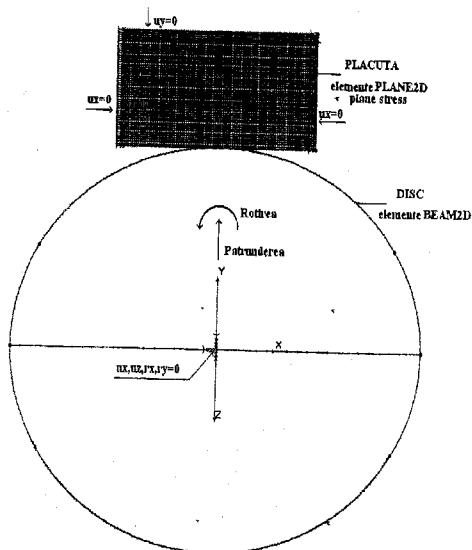


Fig. 4.1. Modelul cu elemente finite

Ipotezele introduse în acest model sunt:

- nu se consideră pierderea de material prin uzură (experimental, pentru PBT s-a dovedit că pierderea de material este nesemnificativă);
- nu se consideră câmpul termic (se consideră modelul izoterm);
- inelul se consideră perfect rigid și neted, având în vedere diferența de proprietăți mecanice între materialul inelului (oțel durificat) și cel al blocului (polimer);
- materialul blocului se consideră omogen și izotrop;

- proprietățile mecanice ale materialului blocului de PBT au fost introduse pe baza determinărilor la tracțiune prezentate în capitolul 3. Valoarea coeficientul lui Poisson ($\nu = 0,4$) a fost luată din literatura de specialitate [382].

Calculul realizat a fost evasistic (coeficientul de frecare fiind considerat independent de viteza încercării și valorile lui s-au introdus pe baza coeficientului mediu de frecare determinat pentru testele bloc-pe-inel pentru bloc din PBT).

Tipurile de elemente utilizate:

- modelarea blocurilor supuse testului (placă) - elemente PLANE2D plane stress (stare plană de tensiuni), elemente patrulatere cu 4 noduri cu latură de 0,1 mm (modelul blocului conține astfel 5050 elemente); lățimea blocului este 4 mm;

- modelarea inelului (disc) - elemente BEAM2D cu 2 noduri, elemente rigide; lățimea discului este de 10 mm;

- modelarea contactului dintre disc și placă s-a realizat cu elemente de contact GAP nod la linie cu frecare generate automat. Coeficientul de frecare este de 0,2.

Modelul de material:

- model nelinier elasto-plastic (von Mises isotropic) - s-a utilizat curba de material obținută experimental pentru PBT;

- model liniar pentru elementele BEAM2D (inel metalic).

Analiza. Problema de contact este neliniară, chiar dacă structura are deformații mici [45]. Echilibrul structural este determinat incrementând sarcina aplicată (deplasarea fiind impusă). Pentru rezolvarea problemei neliniare programul utilizează metoda Newton-Raphson; în general sunt necesare 6-7 iterații pentru a obține convergența în metoda Newton-Raphson la fiecare pas. Pentru a găsi punctele de contact și tensiunile din această zonă este utilizată formularea Total Lagrangian. Formularea consideră că deformațiile plastice sunt mici. Mărimea incrementelor de încărcare este stabilită automat, activând clauza "autostep". Cazurile rulate pentru această analiză sunt cele din tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Cazuri analizate

Cazul	F [N]	Deplasarea impusă Z [mm]	Lățimea petei de contact, calculată [mm]	Lățimea petei de contact, măsurată [mm]
1	1	0,0341	1,5	1,6
2	2,5	0,0151	1,79	1,3
3	5	0,0185	2,12	2,1
4	10	0,0539	2,94	2,8
5	20	0,1108	3,43	3,5

4.2. Rezultate și discuții

Din tabelul 4.1 se observă că rezultatele obținute pe modelul cu elemente finite realizat sunt în bună concordanță cu rezultatele obținute experimental.

În continuare, figurile 4.2 ... 4.7 prezintă distribuția de tensiuni echivalente (von Mises), distribuția tensiunilor principale σ_1 și σ_2 , distribuția tensiunilor de forfecare în planul xy și distribuția deformațiilor plastice și a deformațiilor totale pentru două cazuri.

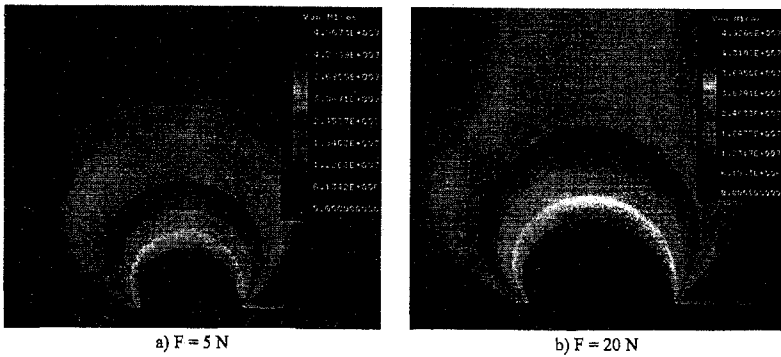


Fig. 4.2. Influența creșterii forței de apăsare normală asupra distribuției de tensiuni von Mises

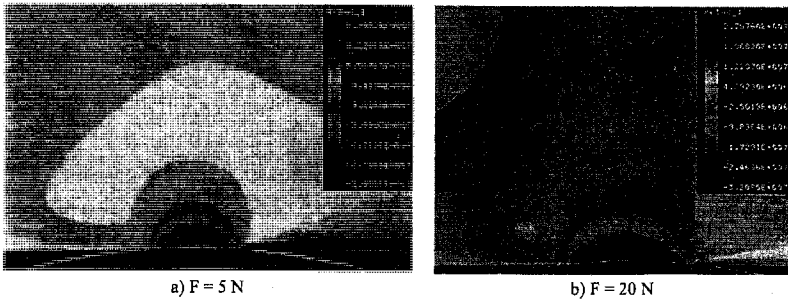


Fig. 4.3. Influența creșterii forței de apăsare normală asupra distribuției de tensiuni principale 1 (σ_1)

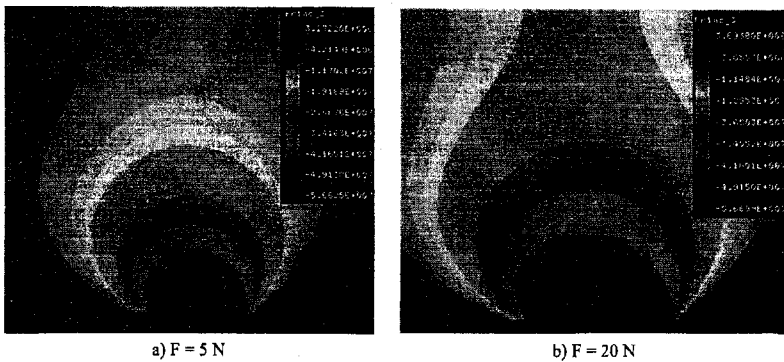


Fig. 4.4. Influența creșterii forței de apăsare normală asupra distribuției de tensiuni principale 3 (σ_3)

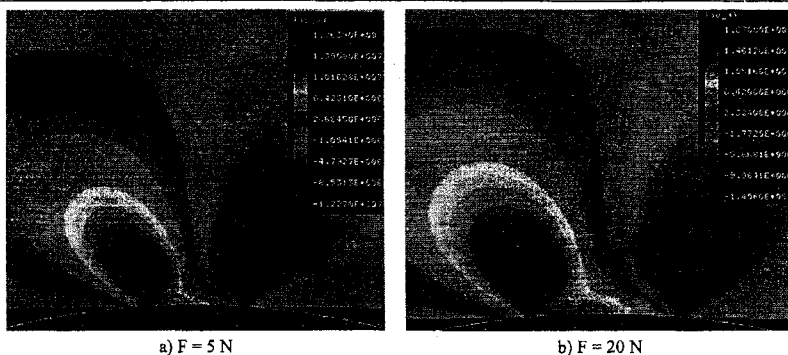


Fig. 4.5. Influența creșterii forței de apăsare normală asupra distribuției de tensiuni de forfecare (τ_{xy})

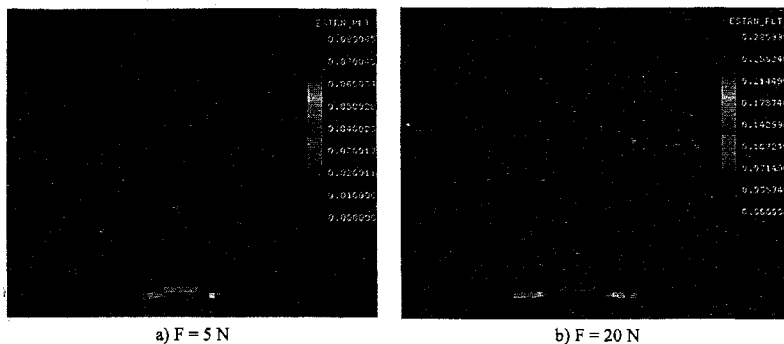


Fig. 4.6. Influența forței de apăsare normală asupra distribuției de deformații plastice totale

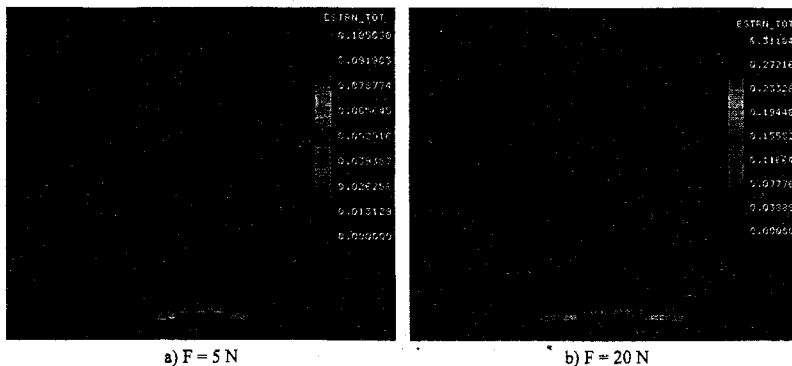


Fig. 4.7. Influența creșterii forței de apăsare normală asupra distribuției de deformații totale

Reprezentând tensiunile maxime în contact (fig. 4.8), se observă că acestea nu cresc proporțional cu sarcina, deoarece apar deformații plastice (fig. 4.9).

Din cauza naturii elasto-vâscoase a materialului, tensiunile maxime von Mises (fig. 4.8) depășesc limita de curgere a materialului (47,316 MPa, așa cum a fost determinată prin teste de tracțiune, vezi capitolul 3). Pe intervalul studiat pentru forța normală, rularea programului a evidențiat o creștere a deformațiilor plastice și totale aproape liniar cu forța de apăsare normală aplicată (fig. 4.9).

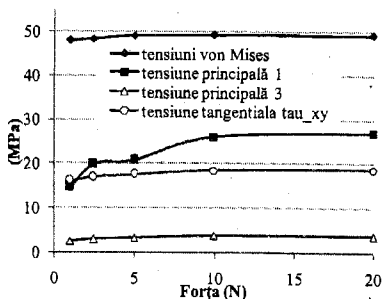


Fig. 4.8. Valorile maxime ale tensiunilor în funcție de forță

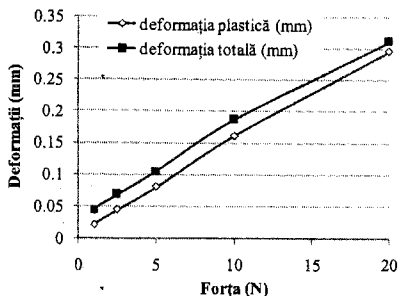


Fig. 4.9. Deformațiile maxime în funcție de forța F pentru blocul din PBT

Pornind de la faptul că experimental s-au obținut valori diferite ale adâncimii de pătrundere pentru condiții identice de testare (forță, viteză, distanță de alunecare) și invers, pentru forțe normale de apăsare diferite, adâncimi de pătrundere ce nu se încadrează într-o tendință liniară de creștere cu creșterea forței, s-a determinat dependența dintre cei doi parametri (fig. 4.10). S-a obținut prin modelarea cu elemente finite o tendință mai accentuată de creștere a forței cu adâncimea de pătrundere decât tendința ipotetică liniară în domeniul considerat. Aceasta justifică faptul că materialul suportă încărcări mai mari fără ca deformațiile să crească în același raport cu forța.

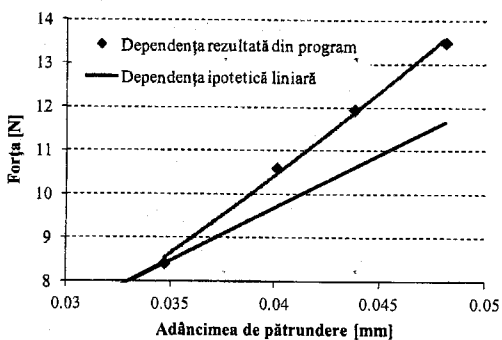


Fig. 4.10. Grafic comparativ al dependențelor forță - adâncime de pătrundere rezultate din modelarea cu elemente finite cu un model ipotetic liniar în domeniul considerat

4.3. Concluzii

Zona cu deformații plastice este mică în toate cazurile. Distribuția deformațiilor specifice ajunge să aibă o transmitere pe verticală cu cât blocul din PBT se apropie de profilul unui sabot în zona de contact (fig. 4.7.b).

Tensiunile echivalente Von Mises depășesc limita de curgere a materialului PBT.

Materialul are o capacitate mare de a suporta încărcări fără să se deformeze foarte mult.

Tensiunile tangențiale (de forfecare) sunt mari, apropiate de tensiunea tangențială de curgere, care este aproximativ 0,2 din tensiunea normală de curgere pentru majoritatea polimerilor termoplastici [57].

Distribuția parametrului STRESS INTENSITY (diferența dintre tensiunea principală maximă și cea minimă) este dată în figura 4.11, pentru cazul 5. Zona în care acest parametru atinge valoarea maximă este și cea în care materialul se poate rupe și apoi îndepărta prin uzură.



Fig. 4.11. Distribuția parametrului STRESS INTENSITY (diferența dintre tensiunea principală maximă și cea minimă)

CAPITOLUL 5

CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND EVOLUȚIA CALITĂȚII SUPRAFETEI LA TRIBOMODELE DIN MATERIALE COMPOZITE PE BAZĂ DE PBT

5.1. Metodologie caracteristică de măsurare a parametrilor texturii suprafeței

Pentru evaluarea calității suprafeței s-a utilizat profilometrul Laser NANOFOCUS μ SCAN, din cadrul Universității "Ștefan cel Mare" din Suceava. Acesta este un profilometru optic destinat măsurării bidimensionale și tridimensionale fără contact a microtopografiei suprafețelor, cu intervalul de măsurare de $150 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, intervalul de măsurare pe verticală $1,00 \text{ }\mu\text{m}$ până la 18 mm , rezoluția pe verticală de 25 nm [417]. Pentru prelucrarea rezultatelor s-au utilizat programele SPIP 5.1.11 [424] și Gwyddion 2.25 [404].

Pentru calcularea parametrilor 3D s-au selectat câte 3 zone de $500 \text{ }\mu\text{m} \times 500 \text{ }\mu\text{m}$, atât de pe urma de uzură a blocului polimeric, cât și de pe inelul de rulment ($100 \text{ }\mu\text{m} \times 100 \text{ }\mu\text{m}$), în zona de contact. Zona investigată pe inel a fost determinată și de curbura suprafeței inelului. Pentru suprafețele neuzate, forma și mărimea zonelor investigate au fost aceleași. Pasul de măsurare este același și pentru măsurătorile 3D și pentru cele 2D: $5 \text{ }\mu\text{m}$. Distanța între linii la măsurătorile 3D este tot de $5 \text{ }\mu\text{m}$.

Parametrii 2D sunt media a trei măsurători, adică trei linii de pe un pătrat investigat: una la mijlocul pătratului de $500 \text{ }\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$, și celelalte două la $125 \text{ }\mu\text{m}$ deasupra și sub prima măsurătoare. Profilele liniare trebuie să fie perpendiculare pe direcția de alunecare, și la inel și la bloc.

Parametrii 3D sunt calculați pentru toate valorile $z(x,y)$, măsurate pe zona de măsurare $500 \text{ }\mu\text{m} \times 500 \text{ }\mu\text{m}$.

Figura 5.1 prezintă o urmă de uzură, așa cum este reconstruită cu ajutorul programului NanoFocus al profilometrului. 1, 2 și 3 sunt zonele din care s-au extras suprafețele pătrate de $500 \text{ }\mu\text{m} \times 500 \text{ }\mu\text{m}$ pentru calcularea parametrilor texturii suprafeței.

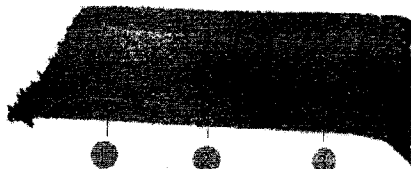


Fig. 5.1. Exemplu de suprafață scanată pentru analiza parametrilor de rugozitate; bloc din PBT + 15% PTFE, după testare în condițiile: $F = 5 \text{ N}$, $v = 0,75 \text{ m/s}$, $L = 7500 \text{ m}$

În acest studiu s-au introdus următoarele notații pentru evaluarea împrăștierei valorilor măsurate pentru un parametru al rugozității. Se va exemplifica cu ajutorul parametruului de medie aritmetică a rugozității, R_a sau S_a , în funcție de metoda de măsurare (2D sau 3D).

Fiecare parametru pe zona/linia măsurată, poate fi caracterizat prin:

- valoarea maximă înregistrată, notată cu Ra_{max} sau Sa_{max} ;
- valoarea minimă înregistrată, notată cu Ra_{min} sau Sa_{min} ;
- valoarea medie a parametrului din mai multe măsurători, Ra_m sau Sa_m :

$$Ra_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ra_i \quad (5.1)$$

$$Sa_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Sa_i \quad (5.2)$$

în care Ra_i este valoarea parametrului Ra pentru măsurătoarea (linia) i , Sa_i este valoarea parametrului Sa pentru măsurătoarea i (pe aria investigată), n fiind numărul de măsurători (în acest studiu $n = 9$ pentru valori 2D și $n = 3$ pentru cele 3D);

- abaterea superioară față de media calculată pentru n măsurători:

$$As = Ra_{max} - Ra_m \quad (5.3)$$

- abaterea inferioară față de media calculată pentru n măsurători:

$$Ai = Ra_{min} - Ra_m \quad (5.4)$$

- abaterea superioară față de media calculată pentru n măsurători:

$$As(\%) = \frac{As}{Ra_m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.5)$$

- abaterea inferioară față de media calculată pentru n măsurători:

$$Ai(\%) = \frac{Ai}{Ra_m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.6)$$

Ținând cont de aceste notații, în tabelele următoare (5.1 și 5.2) sunt dați parametrii de rugozitate și sub forma: $Ra_{m \frac{As(\%)}{Ai(\%)}}$.

5.2. Analiză comparativă a valorilor parametrilor 2D și 3D pentru suprafețele neuzate și uzate ale compozitului GB10

Figura 5.2 prezintă parametrii de amplitudine 2D și 3D pentru suprafața neuzată a compozitului PBT + 10% MSS. Analizând această figură, se pot face următoarele observații:

- în general, valoarea medie a aceluiași parametru este mai mare pentru evaluarea 3D comparativ cu valoarea obținută în 2D, iar intervalul de împrăștiere este mai mic pentru 3D comparativ cu cel obținut în 2D;

- pentru parametrii Ra , Sa , Rq , Sq și chiar Rsk , Sku s-au obținut valori medii apropiate, ceea ce înseamnă că acești parametri sunt mai puțin sensibili la metoda de măsurare;

- pentru ceilalți parametri de amplitudine analizați, valorile medii 2D sunt mai mici față de valorile medii 3D pentru același parametru;

- cea mai mare diferență s-a constatat între valorile medii pentru Rz și Sz și respectiv, Rv și Sv . Valorile pentru Rp și Sp au fost apropiate ca medie și ca mărime a intervalului de împrăștiere, probabil din cauza dispersiei uniforme a materialului de adaos.

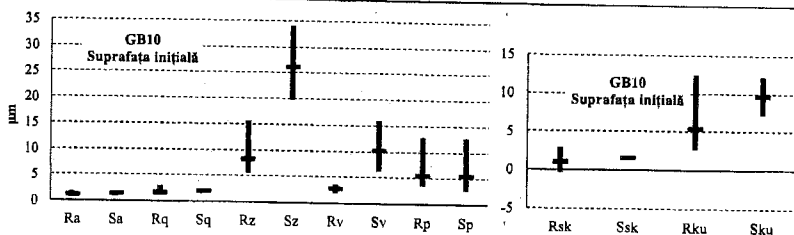


Fig. 5.2. Comparație între valori ale parametrilor de amplitudine 3D și 2D, pentru 3 zone investigate (9 măsurători 2D și 3 măsurători 3D) de pe suprafața inițială a materialului compozit PBT + 10% MSS

Cum în tribologie valorile extreme ale asperităților sunt importante, atât în contactul uscat, cât și în cel lubrifiat, ar rezulta că măsurătorile 3D reflectă mai bine calitatea suprafeței.

Parametrii de amplitudine

Figura 5.3 prezintă o comparație între valorile medii și intervalele de împrăștiere obținute pentru parametrii 2D și 3D, pentru suprafețele neuzate și uzate ale compozitului PBT + 10% MSS, testat la $F = 5 \text{ N}$ și $L = 7500 \text{ m}$, în regim uscat. Tot aceste grafice reflectă influența vitezei de alunecare asupra parametrilor de amplitudine ai texturii suprafeței blocului din compozit polimeric. Având în vedere numărul mare de date analizate (9 profile 2D, câte 3 de pe fiecare zonă de $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$) și 3 zone pentru parametrii 3D, se consideră că tendințele pot fi analizate în sensul comparării valorilor și evidențierii avantajelor oferite de parametrizarea 3D.

Calitativ, tendințele de evoluție a parametrilor 2D și 3D în funcție de viteză sunt similare, dar valorile diferă mult.

În general, valoarea medie a parametrilor 3D este mai mare, dar intervalul de împrăștiere este mai mic. De exemplu, media parametrului Ra este cu 15...20% mai mică decât valorile obținute pentru media parametrului Sa.

Din figura 5.3 rezultă următoarele:

- odată cu creșterea vitezei, calitatea suprafeței uzate se îmbunătățește;
- din punct de vedere al timpului de calcul alocat, având în vedere programul dedicat, pentru cel care efectuează investigația durează mai mult selectarea liniilor și calcularea mediei;
- pentru parametrii Ra-Sa, Rq-Sq, Rsk-Ssk, valorile medii obținute diferă relativ puțin;
- diferențe mari apar pentru Rku-Sku, Rz-Sz, Rv-Sv, Rp-Sp; valorile obținute pentru parametrii 3D sunt mai mari (aproape toți aceștia sunt de două ori mai mari);
- intervalele de împrăștiere sunt mai mici pentru parametrii 3D.

Acest studiu trece în revistă parametrii de amplitudine (Ra, Rq, Rp, Rv, Rz, Rsk, Rku și "omologii" 3D, Sa, Sq, Sp, Sv, Sz, Ssk, Sku) și cei funcționali (Rp, Rk, Rvk, respectiv Sp, Sk, Sv). Utilizarea parametrului Ra (sau Sa) în evaluarea calității suprafețelor nu este suficientă, pentru că în practică pot exista suprafețe cu aceleași valori ale lui Ra (sau Sa), dar cu caracteristici mult diferite, care vor afecta semnificativ comportarea în regim uscat sau lubrifiat a acestora [42], [386], [409].

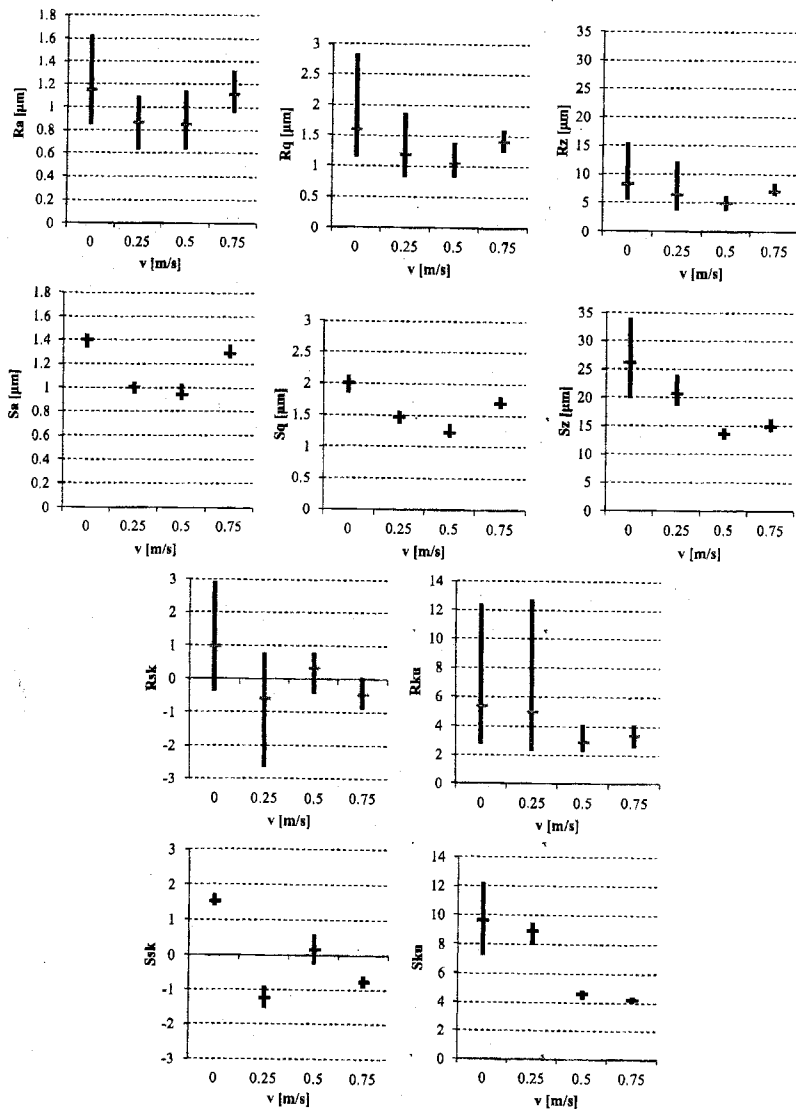


Fig. 5.3. Valorile medii și intervalele de împrăștiere ale parametrilor de amplitudine 2D și 3D pentru suprafețele investigate (suprafața neuzată - $v = 0$ m/s), pentru blocul realizat din PBT + 10% MSS, teste realizate cu forța $F = 5$ N și distanța de alunecare $L = 7500$ m

Ra sau Sa nu oferă informații despre structura spațială și nu diferențiază văile și vârfulurile topografiei. Malburg [226] a apreciat calitatea suprafeței și prin raportul

$$Rz/Ra = \frac{Rz}{Ra} \quad (5.7)$$

pentru suprafețe honuite, deci cu finisare foarte bună. În acest studiu se consideră că acest raport trebuie luat în considerare și la studiul suprafețelor uzate. În cazul acestora, o valoare mică a acestui raport poate indica o calitate bună a suprafeței uzate, deja utilizate, și o continuare a funcționării tribosistemului în condiții bune. O valoare mare poate caracteriza o suprafață cu vârfuri și/sau văi (rare sau nu), dar foarte înalte, ceea ce presupune un proces agresiv de uzare, cel puțin în zona existenței maximumului singular al înălțimilor asperităților. În cazul compozitelor polimerice, asperitățile foarte înalte rezultate pe suprafețele uzate, arată prezența elementelor dure, rămase în stratul superficial după detașarea preferențială a polimerului.

În acest studiu, rapoartele Rz/Ra și Sz/Sa s-au calculat cu valorile medii obținute conform metodologiei descrise mai sus.

Tabelele 5.1 și 5.2 prezintă valorile medii și abaterile inferioară, respectiv superioară, pentru fiecare parametru analizat. În standardele internaționale se recomandă pentru suprafețe bine prelucrate ca aceste abateri să fie în limita a $\pm 16\%$ pentru parametrii 2D [413], dar este vorba despre suprafețe finisate, neutilizate încă. Din tabele se observă că acest interval ar fi respectat doar pentru câțiva parametri 3D (Sa , Sq și Sz - cu excepția suprafeței inițiale).

Din tabelele 5.1 și 5.2 se observă că pentru metoda de eșantionare utilizată în acest studiu, pentru blocurile polimerice, raportul Sz/Sa este mai mult de două ori mai mare decât Rz/Ra . Rezultă că evaluarea calității suprafeței prin parametrii 3D poate evidenția cu o probabilitate mai mare existența valorilor extreme. Se observă o scădere a acestui raport cu creșterea vitezei, mai accentuată pentru Sz/Sa . Rezultă că la viteze mai mari, suprafețele uzate au o calitate mai bună comparativ cu cele obținute pentru viteza mai mică de testare (în cazul prezentului studiu, $v = 0,25$ m/s), aspect de care este interesat un proiectant atunci când va selecta regimul de lucru al tribosistemului, mai ales în cazul regimului cu porniri și opriri repetate.

Tabelul 5.1. Valorile medii și intervalul de împrăștiere pentru parametrii 2D de amplitudine, pentru blocurile de PBT + 10% MSS

Parametrul	Suprafața inițială	$v = 0,25$ m/s	$v = 0,50$ m/s	$v = 0,75$ m/s
Ra [μ m]	1,152 ^{+41,4%} -26,7%	0,870 ^{+25,4%} -26,7%	0,852 ^{+33,9%} -25,2%	1,114 ^{+18,5%} -13,8%
Rq [μ m]	1,610 ^{+75,8%} -29,2%	1,199 ^{+54,9%} -30,6%	1,061 ^{+31,4%} -21,6%	1,417 ^{+13,0%} -12,0%
Rp [μ m]	5,499 ^{+132,5%} -50,8%	2,667 ^{+17,3%} -25,3%	2,731 ^{+28,5%} -28,1%	3,233 ^{+15,3%} -12,1%
Rv [μ m]	2,81 ^{+26,1%} -30,9%	3,831 ^{+137,0%} -56,5%	2,270 ^{+65,7%} -26,7%	3,980 ^{+24,86%} -28,9%
Rz [μ m]	8,307 ^{+87,2%} -33,1%	6,499 ^{+87,9%} -41,2%	5,002 ^{+26,2%} -23,7%	7,214 ^{+16,7%} -10,8%
Rsk	0,989 ^{+196,2%} -138,1%	-0,590 ^{-230,9%} -348,2%	0,329 ^{+135,1%} -231,2%	0,461 ^{+14,5%} -87,6%
Rku	5,399 ^{+129,9%} -49,3%	5,009 ^{+153,5%} -53,9%	2,939 ^{+40,3%} -21,4%	3,380 ^{+22,6%} -23,9%
Rz/Ra	7,210	7,470	5,870	6,475

Tabelul 5.2. Valorile medii și intervalul de împrăștiere pentru parametrii 3D de amplitudine, pentru blocurile de PBT + 10% MSS

Parametrul	Suprafața inițială	v=0,25 m/s	v=0,50 m/s	v=0,75 m/s
Sa [μm]	1,404 ^{+3,0%} -5,0%	1,010 ^{+3,2%} -5,9%	0,946 ^{+8,6%} -5,1%	1,293 ^{+5,5%} -3,1%
Sq [μm]	2,007 ^{+6,0%} -8,1%	1,473 ^{+5,2%} -6,8%	1,234 ^{+10,4%} -6,5%	1,697 ^{+6,0%} -4,3%
Sp [μm]	15,974 ^{+13,6%} -15,1%	9,971 ^{+23,4%} -16,3%	6,019 ^{+4,2%} -6,4%	6,159 ^{+5,2%} -4,0%
Sv [μm]	10,229 ^{+55,4%} -39,0%	10,742 ^{+9,7%} -5,3%	7,675 ^{+9,3%} -7,1%	8,788 ^{+12,3%} -6,5%
Sz [μm]	26,204 ^{+29,9%} -24,4%	20,713 ^{+16,3%} -10,1%	13,694 ^{+7,1%} -26,7%	14,948 ^{+9,4%} -5,5%
Ssk	1,541 ^{+11,0%} -9,8%	1,228 ^{+26,2%} -25,1%	0,157 ^{+263,5%} -267,3%	-0,754 ^{+20,7%} -22,7%
Sku	9,643 ^{+26,5%} -25,0%	8,917 ^{+6,1%} -10,6%	4,606 ^{+5,4%} -7,9%	4,205 ^{+4,6%} -5,3%
Sz/Sa	18,663	20,507	14,475	11,560

Pentru inelele de rulment, suprafețele neuzate au un raport inițial Sz/Sa ≈ 3 și nu se modifică prea mult după testare, rămânând în jurul acestei valori, ceea ce poate fi un argument în plus în susținerea afirmației că PBT și materialele pe bază de PBT care au făcut obiectul acestui studiu, nu au un proces intens de transfer și de adeziune pe suprafața metalică, cel puțin pentru testele efectuate (F = 1 N, ..., 5 N, v = 0,25 m/s, ..., 0,75 m/s).

Parametrii funcționali

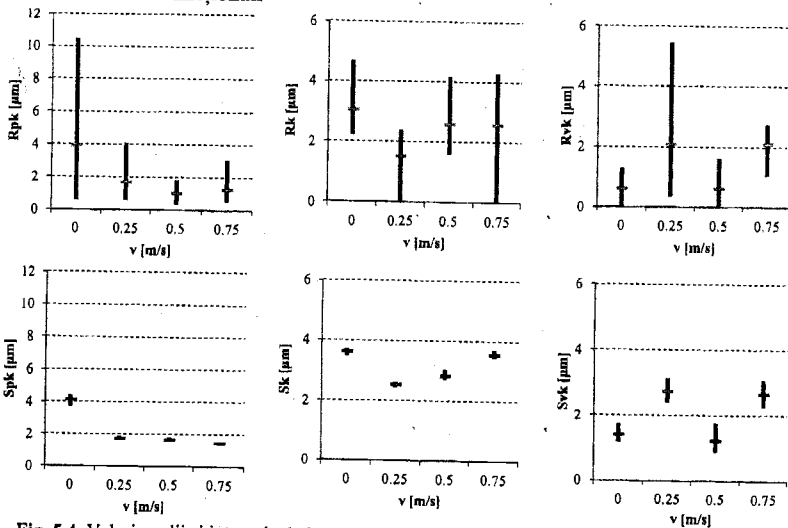


Fig. 5.4. Valori medii și intervale de împrăștiere ale parametrilor funcționali pentru blocurile de PBT + 10% MSS, în funcție de viteza de testare (v = 0 m/s este asociată cu suprafața inițială, neuzată); teste efectuate cu F = 5 N și L = 7500 m

Figura 5.4 prezintă valorile medii și intervalele de împrăștiere ale parametrilor funcționali 2D și 3D, pentru blocul de PBT + 10% MSS. Se observă intervale de împrăștiere

mult mai mari pentru măsurătorile 2D, dar valorile medii sunt destul de apropiate, puțin mai ridicate pentru măsurătorile 3D. Valorile medii obținute prin măsurătorile 3D sunt mai mari pentru toți parametrii. Media parametrilor funcționali 2D s-a calculat pentru nouă profile, selectate câte trei de pe fiecare zonă investigată 3D. Valorile parametrilor funcționali 3D s-au calculat ca medie a trei valori obținute pe fiecare zonă investigată. Scăderea valorilor pentru R_k sau S_k indică o scădere a rezistenței texturii la preluarea sarcinii în contact, iar valori mari pentru R_{pk} sau S_{pk} indică o probabilitate mare ca materialul din această zonă, mai mult sub formă de asperități înalte și înguste să fie uzat (detașat).

Concluzii. Evaluarea calității suprafețelor uzate sau nu, cu ajutorul parametrilor 3D este mai aproape de realitate, cu cât pasul este mai fin, și zona de investigație mai mare (sau rezultat al unei medii a 3...5 măsurători pe suprafața studiată), în cazul unei analize 3D.

În cazul suprafețelor uzate, interesează mult valorile pentru S_{sk} , S_{ku} , S_z , S_p și S_v , pentru că vârfurile înalte afectează parametrii tribologici, mai ales în cazul compozitelor care au particule cu dimensiuni apropiate cu pasul de măsurare sau/și cu o distribuție locală neuniformă a materialului de adaos.

5.3. Influența materialelor de adaos asupra parametrilor 3D ai rugozității suprafețelor din materiale compozite pe bază de PBT

Următoarele studii sunt realizate numai cu ajutorul parametrilor 3D.

I. Compozite PBT + MSS

Figura 5.5 prezintă, sintetic, valorile medii ale parametrilor de amplitudine ai rugozității. Pentru suprafețele inițiale, neuzate (asociate cu $v = 0$ m/s), așa cum au fost obținute din procesul de injectare, se observă:

- o creștere a valorilor medii ale parametrilor S_a și S_q cu 20% și respectiv 18% pentru compozitele cu MSS (procent calculat față de valorile blocurilor din PBT), dar creșterea concentrației masice de MSS, de la 10% la 20%, modifică nesemnificativ acești parametri;
- S_z crește doar cu 25% (calculat la fel, față de valoarea obținută pe blocul de PBT);
- S_{sk} și S_{ku} au, fiecare, valori apropiate pentru PBT și compozitele PBT + MSS.

Pentru suprafețele uzate, se pot concluziona următoarele:

- pentru suprafețele blocurilor de PBT, S_a și S_q scad semnificativ față de valorile obținute pe suprafața inițială (neuzată), dar cresc cu creșterea vitezei de alunecare, iar S_z scade de patru ori, fiind însă aproape insensibil cu modificarea vitezei;

- o creștere mai mare a parametrilor S_z și, implicit, S_p și S_v ;

- valorile medii ale parametrilor de amplitudine nu au o sensibilitate evidentă cu viteza de testare, ceea ce înseamnă că viteza nu recomandă unul din compozitele PBT + MSS testate; altfel spus, evoluția calității suprafeței nefiind sensibilă cu viteza, elementele executate din aceste materiale pot accepta regimuri de lucru cu viteze diferite (dacă așa o cere procesul de lucru) fără a afecta sensibil calitatea suprafeței,

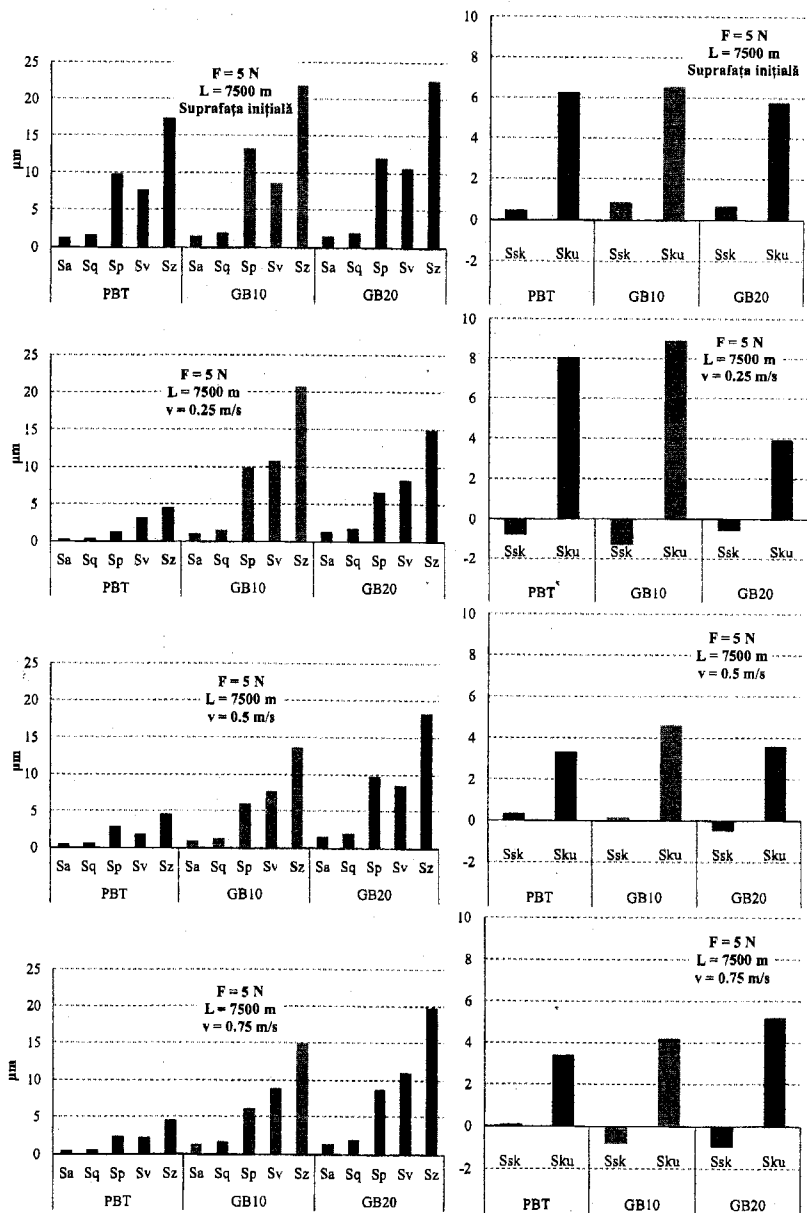
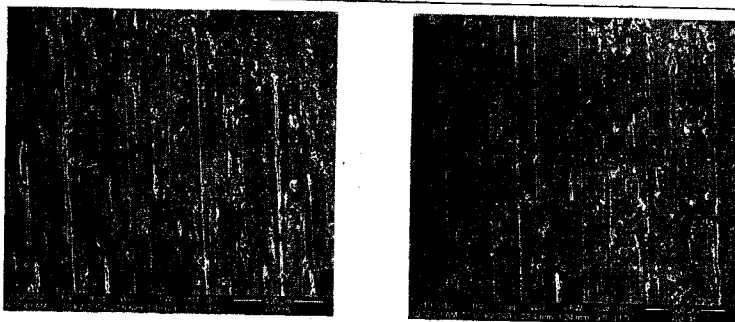


Fig. 5.5. Evoluția valorilor medii ale parametrilor de amplitudine ai rugozității pentru suprafețele blocurilor din PBT, GB10 și GB20



a) PBT + 10% MSS

b) PBT + 20% MSS

Fig. 5.6. Aspectul suprafețelor uzate, pentru condițiile de testare $v = 0,5$ m/s, $L = 7500$ m, $F = 5$ N

Pentru PBT și compozitele PBT + MSS, inclusiv cel hibrid GB10-PF10 (fig. 5.12), suprafețele uzate se caracterizează prin valori pozitive ale parametrului S_{sk} , ceea ce înseamnă o distribuție aproape simetrică a înălțimilor asperităților [42]. Suprafețele uzate sunt caracterizate prin S_{sk} oscilând în jurul valorii 0, ceea ce înseamnă existența unei distribuții echilibrate de vârfuri și văi.

La $v = 0,50$ m/s (fig. 5.6) și $v = 0,75$ m/s, $S_{sk} < 0$, ceea ce înseamnă existența unor văi adânci, dar înguste, rezultate foarte probabil prin abraziune, micro-brăzdare. $S_{ku} > 3$ pentru toate suprafețele uzate indică văi și vârfuri înguste și lungi (înalte sau adânci), dar distribuția înălțimilor are un interval relativ mic; predomină golurile, rezultate la compozite prin smulgerea microsferelor de sticlă și păstrarea formei matricei polimerice.

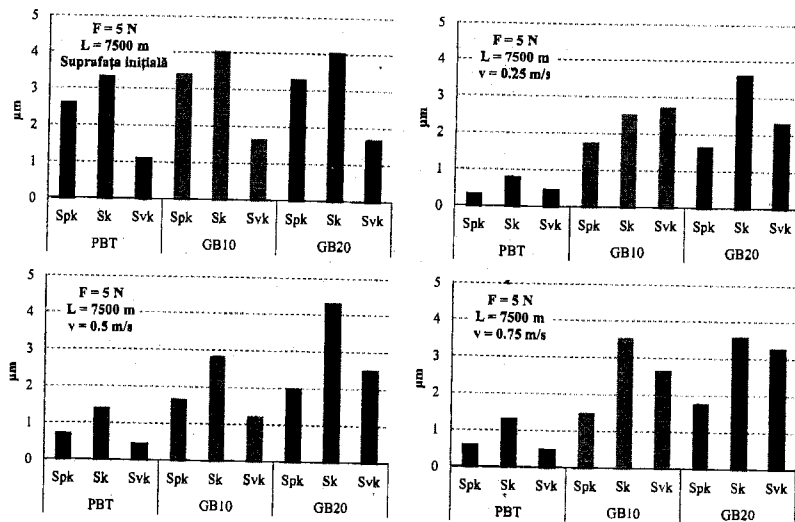


Fig. 5.7. Valorile medii ale parametrilor funcționali ai rugozității pentru PBT, GB10 și GB20

Pentru $v = 0,25$ m/s, s-au obținut valori mari pentru S_{ku} pentru PBT și PBT + 10% MSS; la $v = 0,5$ m/s nu există o tendință clară pentru S_{ku} și S_{sk} de dependență față de concentrația de MSS. La $v = 0,75$ m/s există o creștere a lui S_{ku} cu concentrația de MSS, iar S_{sk} scade ușor cu concentrația de MSS.

La suprafețele neuzate (fig. 5.7), se observă că valorile medii ale parametrilor funcționali ai materialelor compozite PBT + MSS sunt mai mari decât cele ale materialului de bază (PBT), dar cu diferențe relativ mici.

Pentru suprafețele uzate, atât pentru materialul de bază, cât și pentru toate materialele compozite cu adaos de microsferă de sticlă, valorile medii ale parametrilor funcționali ai rugozității sunt mai mici decât ai suprafețelor inițiale.

Cele mai mici valori, indiferent de viteză, s-au obținut pentru PBT. Tot pentru polimer s-a observat o tendință clară de creștere a valorilor medii ale parametrilor funcționali cu viteza de alunecare. S_{pk} , S_k și S_{vk} au valori aproape duble pentru compozite comparativ cu PBT, indiferent de viteză. La $v = 0,75$ m/s influența concentrației de microsferă de sticlă asupra parametrilor de rugozitate este slabă și pentru că proprietățile polimerului scad datorită încălzirii și suprafața este mai ușor "netezită".

Figura 5.8 prezintă imagini virtuale (reconstruite) cu ajutorul programului SPIP 5.1.11, în care se observă urme de uzură abrazivă și faptul că microsferele de sticlă din PBT nu migrează sub acțiunea inelului dur, așa cum se întâmplă cu același tip de material de adaos în alte materiale de bază, de exemplu, în PA [98], [225].

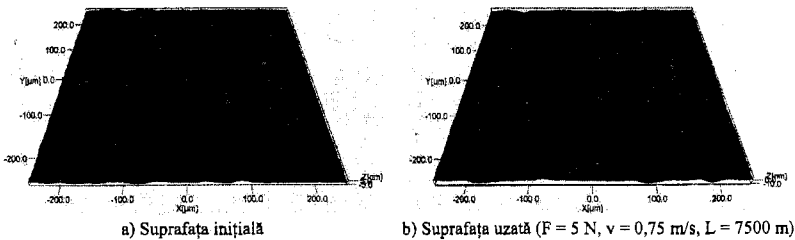


Fig. 5.8. Imagini virtuale ale suprafeței blocurilor din PBT + 20% MSS

II. Amestecurile polimerice PBT + PTFE

Pentru suprafețele neuzate se observă o ușoară scădere a parametrilor de amplitudine când se adaugă PTFE, dar fără o dependență clară de concentrația PTFE (fig. 5.9).

Pentru suprafețele uzate, se constată:

- valori mai mici pentru toți parametrii de amplitudine, comparativ cu cei obținuți pentru suprafețele neuzate, fără o sensibilitate clară față de concentrația de PTFE;
- S_{sk} oscilează în jurul valorii zero, iar S_{ku} în jurul valorii 3 (care descrie o suprafață gaussiană). $-1 < S_{sk} < 0,5$ indică asperități mai înguste și relativ mai înalte, probabil rezultate din ruperea polimerului prin delaminare sau adeziune.

Parametrii funcționali ai suprafețelor neuzate au valori foarte apropiate, aproape insensibile cu concentrația de PTFE (fig. 5.10).

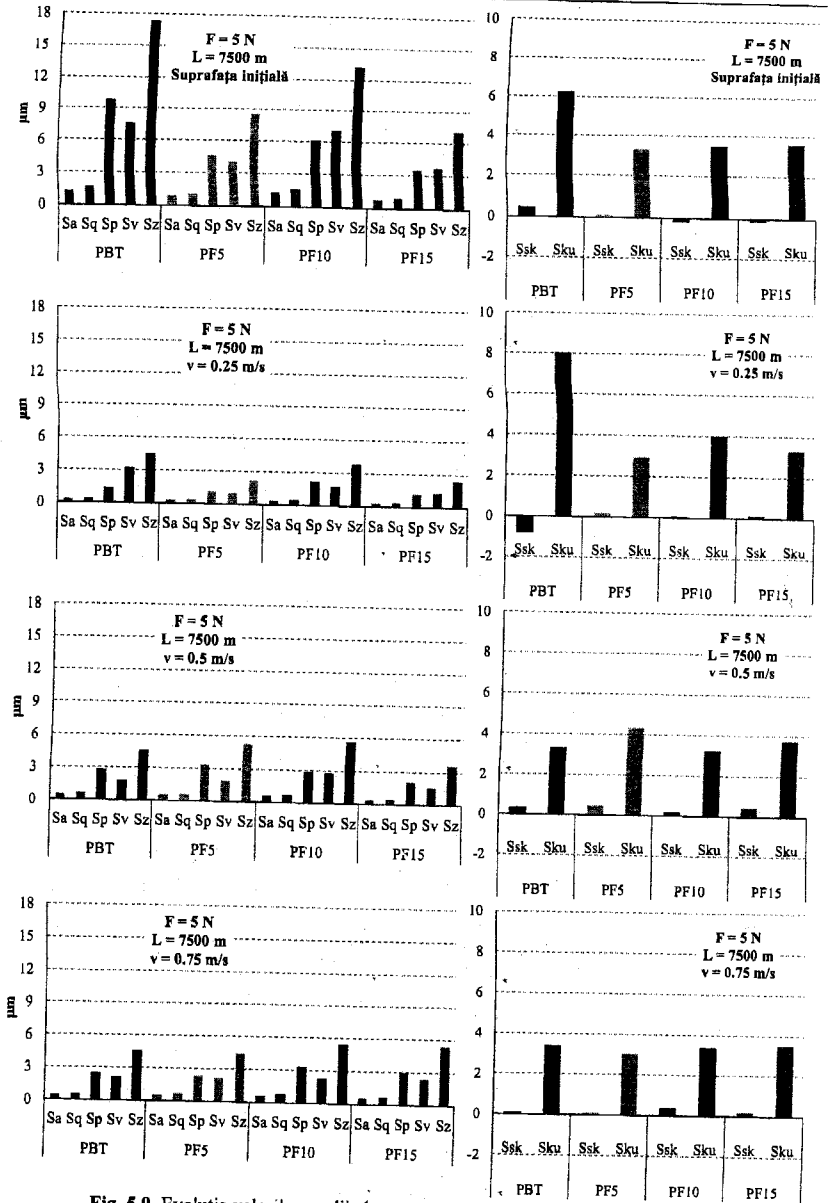


Fig. 5.9. Evoluția valorilor medii ale parametrilor de amplitudine ai rugozității pentru PBT, PF5, PF10 și PF15

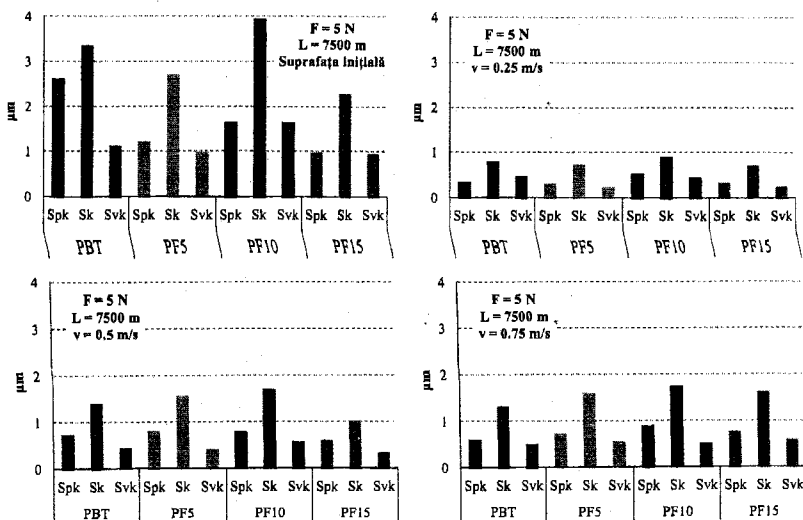


Fig. 5.10. Evoluția valorilor medii ale parametrilor funcționali ai rugozității pentru PBT, PF5, PF10 și PF15

Suprafețele uzate sunt calitativ similare în privința parametrilor funcționali. Se observă doar o ușoară tendință de creștere a lor o dată cu creșterea vitezei. Rezultă că, la viteze mari de alunecare ($v = 0,75 \text{ m/s}$), calitatea suprafeței uzate se poate înrăutăți. Cauza ar fi regimul termic mai ridicat, ceea ce presupune reducerea durtății materialului polimeric, deformații mari și o probabilitate mai mare de micro-brăzdare de către asperitățile metalice, care, practic, rămân cu proprietăți aproape nmodificate în domeniul de temperaturi în care polimerul se înmoaie.

Prezența PTFE, un polimer "mai moale" comparativ cu PBT, determină netezirea suprafețelor uzate și recomandă aceste amestecuri pentru obținerea de suprafețe supuse la utilizări cu întreruperi repetate. Acest lucru se observă și din figura 5.11 ale suprafețelor uzate ale blocurilor din amestecuri polimerice PBT + PTFE.

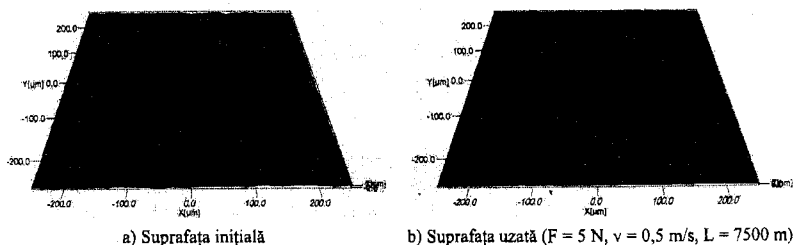


Fig. 5.11. Imagini virtuale ale suprafeței blocurilor din PBT + 15% PTFE

III. Compozitul hibrid PBT + 10% MSS + 10% PTFE

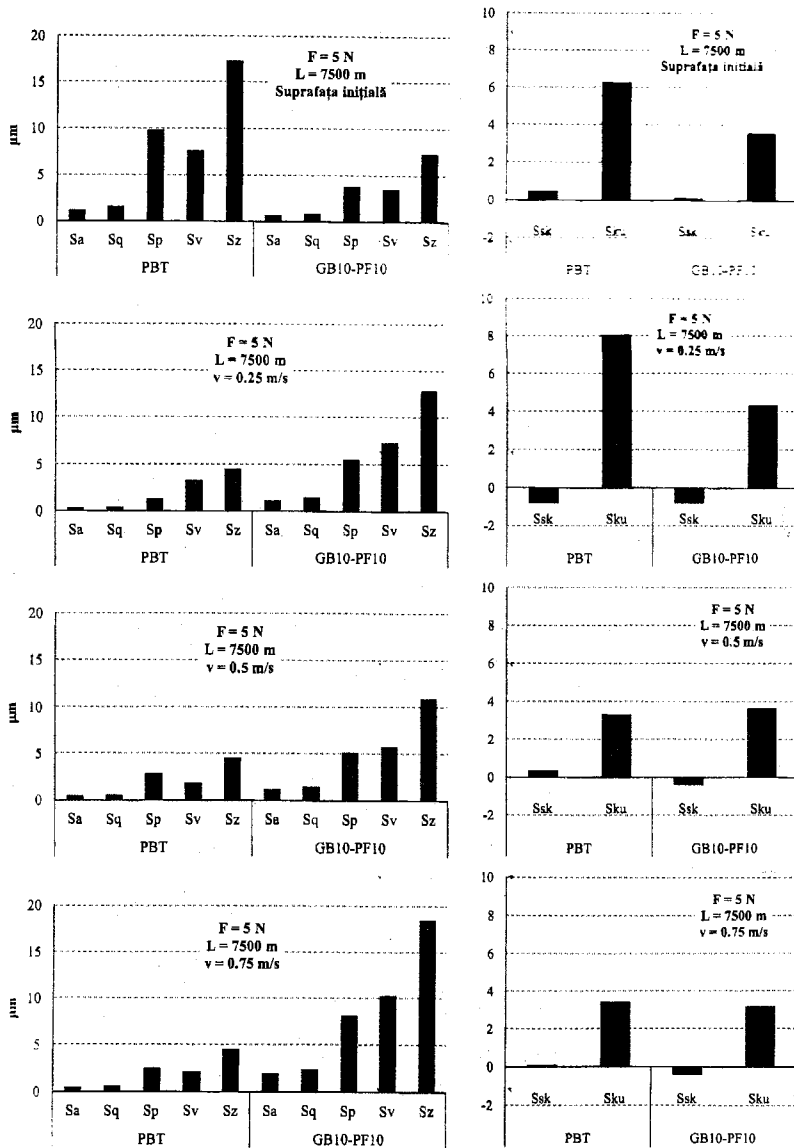


Fig. 5.12. Evoluția parametrilor de amplitudine ai rugozității pentru PBT și GB10-PF10

Deși conține elemente dure, acesta are tendința de a avea suprafețele inițiale similare cu cele ale amestecurilor polimerice, ceea ce subliniază că acest tip de compozit, rezultat prin aditivare cu elemente dure și un polimer mai moale și cu bune proprietăți autolubrifiante, poate genera suprafețe de calitate bună, având proprietăți tribologice superioare sau apropiate celor ale materialelor de la care s-a inițiat studiul: GB10 și PF10 (vezi Capitolul 2).

Figurile 5.12 și 5.13 prezintă o comparație între valorile medii ale parametrilor de rugozitate pentru suprafețele blocurilor de PBT și GB10-PF10.

Spre deosebire de materialul de bază (PBT), la care toți parametrii dimensionali de amplitudine a rugozității (Sa, Sq, Sp, Sv, Sz) au scăzut după uzură, în cazul compozitului hibrid aceștia au crescut comparativ cu starea inițială (neuzată). Prezența microsferelor de sticlă determină o creștere a parametrilor de amplitudine comparativ cu cei obținuți pentru blocurile de PBT și o creștere a lor odată cu creșterea vitezei de alunecare.

Suprafața inițială a GB10-PF10 a avut o distribuție relativ simetrică a asperităților, valoarea lui Ssk fiind foarte apropiată de zero.

După testare, se observă că acest parametru ia valori negative pentru toate vitezele de alunecare, ceea ce înseamnă existența golurilor ascuțite (zgărieturi adânci), respectiv o componentă abrazivă a uzurii (fig. 5.14.b). Această componentă se manifestă mai accentuat pentru viteza redusă de alunecare ($v = 0,25$ m/s).

La viteza de alunecare $v = 0,5$ m/s, distribuția înălțimilor suprafețelor a rămas aproximativ la fel ca a suprafeței inițiale (valori aproximativ egale pentru Sku).

Sku are valori mari pentru PBT la $v = 0,25$ m/s, ce reflectă o componentă de uzură abrazivă mai pronunțată în dauna celei de deformare elasto-plastică și adezivă (fig. 5.14.b).

Numai în cazul vitezei mai mari de alunecare ($v = 0,75$ m/s) se observă că după testare, valoarea lui Sku se află în jurul valorii de 3, ceea ce înseamnă o distribuție relativ uniformă a înălțimilor pe suprafață, fapt datorat probabil înmuierii PTFE din compoziția compozitului hibrid și pătrunderea acestuia în golurile rezultate prin abraziune.

Compozitul hibrid se comportă diferit față de polimer, materialele compozite cu microsferă de sticlă sau amestecurile polimerice în privința parametrilor funcționali ai rugozității, în sensul creșterii acestora după testare și o creștere a lor cu creșterea vitezei de alunecare.

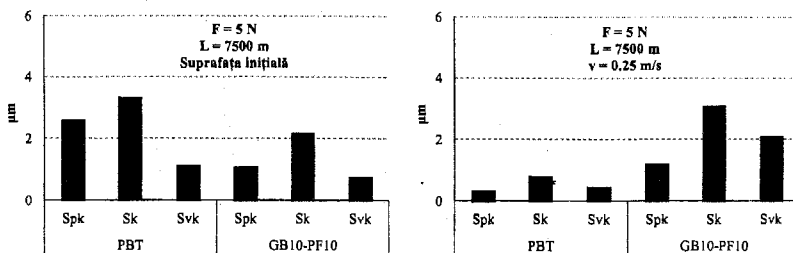


Fig. 5.13. Evoluția parametrilor funcționali ai rugozității pentru PBT și GB10-PF10

Parametrii funcționali cresc pentru GB10-PF10 la $v = 0,75$ m/s, probabil pentru că amestecul polimeric are proprietăți mecanice mai reduse și microsferele de sticlă se smulg mai ușor pentru că frecarea lor de PTFE este mai redusă.

Imaginile virtuale, din figura 5.14, ale suprafețelor blocului de GB10-PF10, confirmă valorile medii mai mari ale parametrilor de amplitudine dimensionali și a celor funcționali ai suprafețelor uzate. În figura 5.14.b se observă dislocarea microsferelor de sticlă și eventuala lor împingere (sau târâre) pe suprafață.

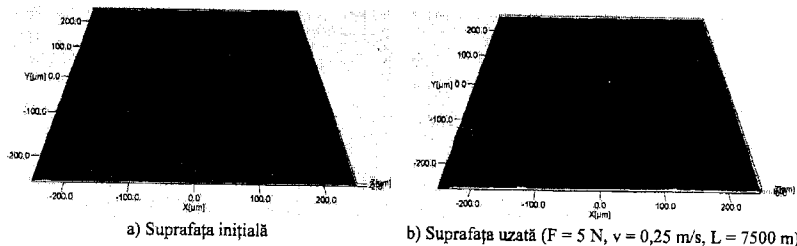


Fig. 5.14. Imagini virtuale ale suprafeței blocurilor din GB10-PF10

Concluzii

Calitatea suprafeței inițiale a materialelor compozite PBT + MSS este asemănătoare (valori aproximativ egale ale parametrilor de amplitudine ai rugozității), dar inferioară celorlalte materiale testate. Adaosul de PTFE îmbunătățește parametrii rugozității, chiar și în cazul compozitului hibrid. În cazul PBT și a amestecurilor polimerice PBT + PTFE, **calitatea suprafeței după uzare** este cu mult mai bună decât calitatea suprafeței inițiale și mai bună decât calitatea suprafeței după efectuarea testelor cu materiale compozite cu adaos de microsferă de sticlă. Singurul material pentru care se observă o diminuare a calității suprafeței după uzare (o creștere a parametrilor de amplitudine și a celor funcționali ai rugozității), comparativ cu suprafața inițială, este compozitul hibrid PBT + 10% MSS + 10% PTFE. Cu toate acestea, valorile parametrilor de rugozitate ale acestui material sunt comparabile cu a materialului compozit PBT + 10% MSS. Adaosul de PTFE nu a avut un efect semnificativ asupra calității suprafețelor uzate. În general, materialele de adaos au avut o influență asupra calității suprafețelor, după testarea în aceleași condiții, similară cu influența asupra coeficientului de frecare (vezi subcapitolul 2.2).

5.4. Influența forței normale asupra parametrilor 3D ai rugozității suprafețelor blocurilor din PBT + 10% PTFE

Având în vedere că PTFE are proprietăți mecanice reduse comparativ cu PBT [59], s-a considerat necesar un studiu asupra influenței sarcinii asupra calității suprafeței. În plus, așa cum s-a observat în capitolul 2, la sarcini mici, coeficientul de frecare a prezentat oscilații mari pentru aceste amestecuri. În figurile 5.15 și 5.16 sunt prezentate valorile medii ale parametrilor de amplitudine și ai celor funcționali, obținuți conform metodologiei prezentate în subcapitolul

5.1, pentru suprafața inițială și apoi pentru suprafețe ale urmelor de uzură de pe blocurile din PF10, pentru cele trei forțe și viteze testate, pentru distanța de alunecare $L = 7500$ m.

Comparativ cu suprafața inițială, așa cum a fost obținută din procesul de injecție în matriță, suprafața urmelor de uzură are atât parametrii de amplitudine, cât și parametrii funcționali, mai mici de două până la trei ori.

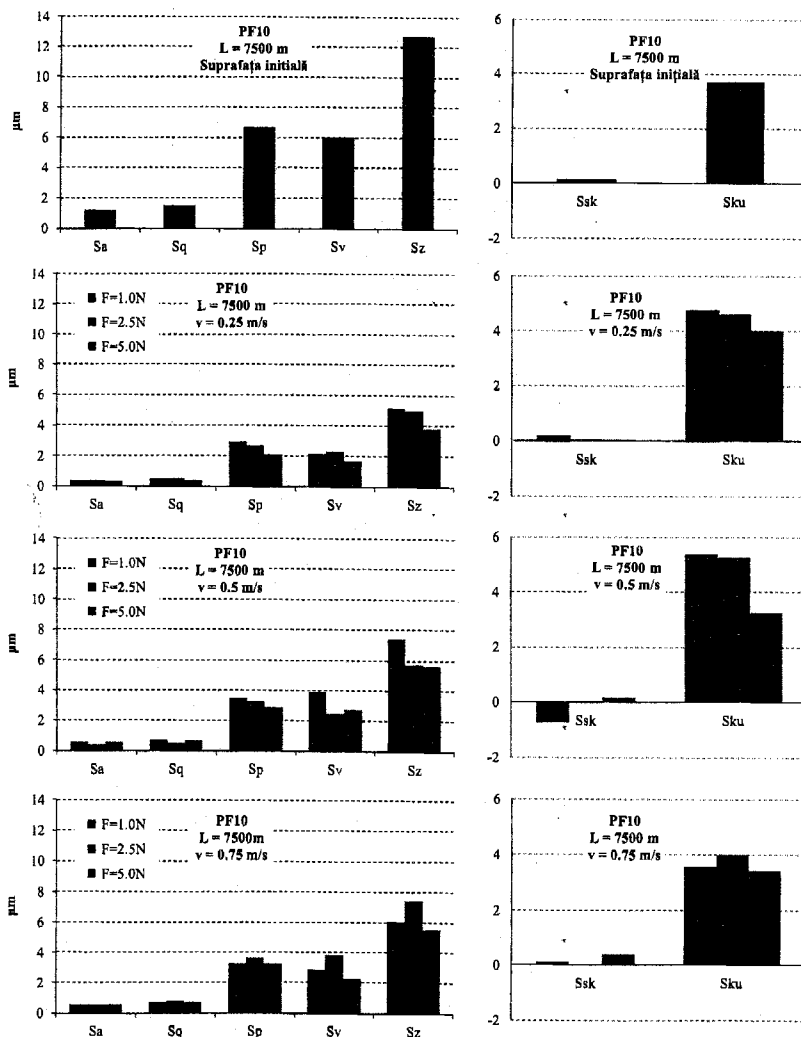


Fig. 5.15. Influența forței normale de apăsare asupra valorilor medii ale parametrilor de amplitudine pentru suprafețele blocurilor din PF10

Pentru acest amestec polimeric, calitatea suprafeței uzate nu este decât în mică măsură dependentă de forța normală aplicată, cel puțin pentru sarcinile studiate ($F = 1, 2,5$ și 5 N). Dacă pentru parametrii Sa și Sq influența forței normale este nesemnificativă (valorile lor medii fiind aproximativ egale), pentru parametrii Sp și Sz se observă o ușoară tendință de scădere a lor cu creșterea forței, pentru vitezele de $0,25\text{ m/s}$ și $0,5\text{ m/s}$.

O ușoară tendință de scădere a parametrilor funcționali cu creșterea sarcinii, s-a observat pentru $v = 0,25\text{ m/s}$. Pentru celelalte două viteze de alunecare testate ($v = 0,50\text{ m/s}$ și $v = 0,75\text{ m/s}$), dependența aceasta slabă de forța de apăsare s-a observat doar pentru Svk . Sarcinile mai mari au micșorat acest parametru funcțional și tendința poate fi pusă pe seama comportării elasto-vâscoase a amestecului polimeric, în sensul împingerii materialului asperității în lateral, cu o „înlățare” a fundului văilor dintre asperități [179], [304].

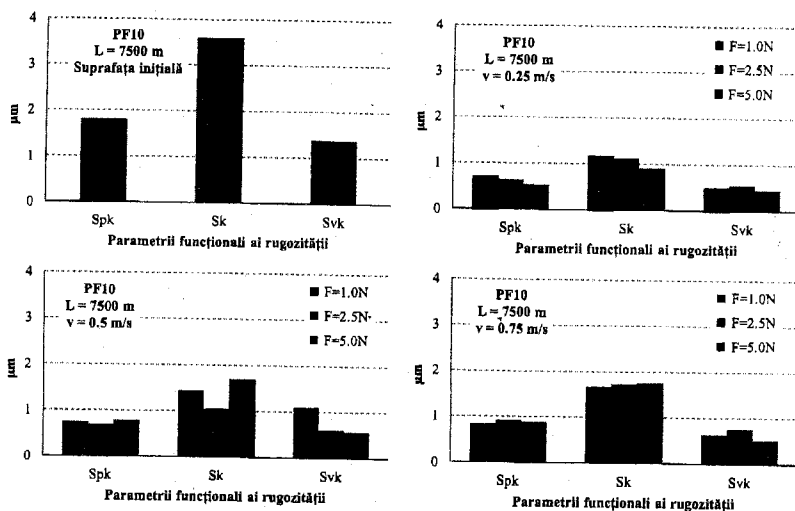


Fig. 5.16. Influența forței normale de apăsare asupra parametrilor funcționali ai rugozității PF10

Concluzie. Pentru materialul și sarcinile luate în studiu, forța normală influențează nesemnificativ calitatea suprafețelor testate.

5.5. Influența materialelor compozite pe bază de PBT testate asupra parametrilor 3D ai rugozității suprafețelor inelelor metalice

Acest studiu s-a realizat pentru toate materialele pe bază de PBT testate în aceleași condiții: $F = 5\text{ N}$, $v = 0,25\text{ m/s}$ și $L = 7500\text{ m}$.

Datele obținute conform metodologiei adoptate pentru parametri suprafețelor inițiale (neuzate) ale inelelor de rulment, din oțel, sunt prezentate în figura 5.17. Valorile medii obținute se încadrează în domeniile recomandate pentru mișcări de alunecare între un material polimeric și o suprafață dură [304], [305], [310].

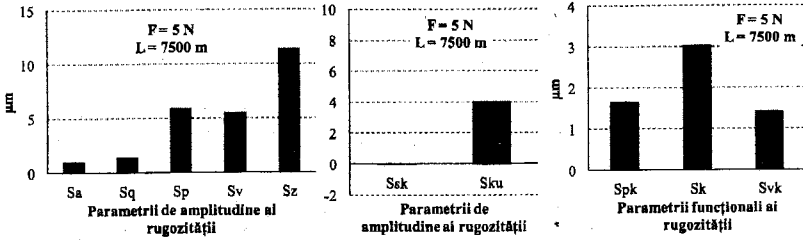


Fig. 5.17. Valori medii ale parametrilor de rugozitate ai suprafețelor inițiale ale inelelor metalice

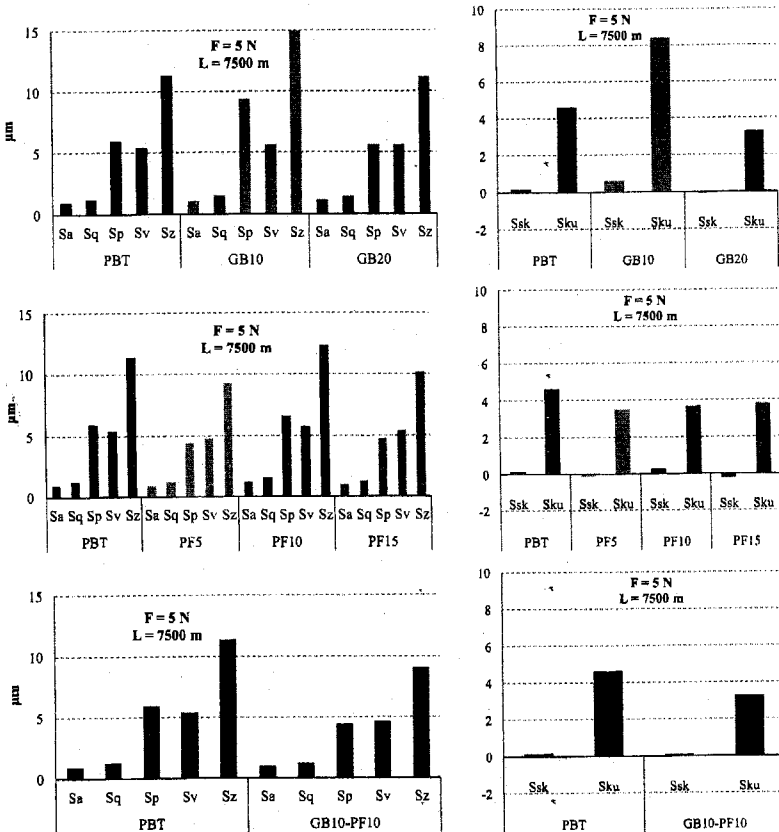


Fig. 5.18. Suprafețe uzate ale inelelor metalice după teste efectuate la $v = 0,25\text{ m/s}$

Figurile 5.18 și 5.19 prezintă sugestiv valorile medii ale parametrilor de amplitudine și funcționali pentru suprafețele urmelor de uzură ale inelelor metalice, în funcție de materialul blocului. Valorile pentru inelul testat cu blocul de PBT sunt păstrate în fiecare grafic din motive de comparație. Se observă următoarele:

- o foarte ușoară creștere a valorilor parametrilor 3D ai inelelor pentru concentrația de 10% MSS;
- pentru blocurile din PBT și amestecurile polimerice PBT + PTFE testate, parametrii de rugozitate ai inelelor nu au o tendință de dependență cu concentrația de PTFE, poate pentru că PBT împiedică transferul de PTFE pe inel, „strângând” eventualele particule de PBT și PTFE în particule tip conglomerat;
- inelele testate cu blocuri din compozitul hibrid au și ele parametrii de amplitudine foarte apropiați de cei obținuți pentru inelele testate cu blocuri din PBT.

Concluzia este că, datorită materialului polimeric de bază, dar și a adaosurilor polimerice în acesta, calitatea suprafețelor inelelor uzate, evaluată prin parametrii de amplitudine, este insensibilă față de natura altor materiale adăugate.

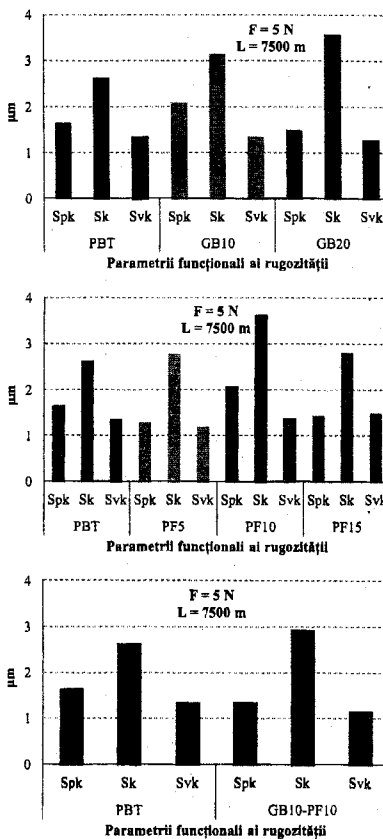


Fig. 5.19. Evoluția valorilor medii ale parametrilor funcionali ai rugozității pentru suprafața uzată a inelelor

Faptul că nu există un transfer de polimer atât de intens cum a fost evidențiat pentru alți polimeri, proces pus în evidență prin microscopie electronică, este susținut și de variația redusă a valorilor medii ale parametrilor 3D ai inelelor după testare. În plus, scenariul ar putea fi completat cu faptul că asperitățile dure sunt rareori rupte.

Pentru compozitele cu microsferă de sticlă s-au observat spargeri ale acestora și fixarea fragmentelor între asperitățile inelului (rareori), ceea ce ar justifica foarte ușoara tendință de creștere a parametrilor de rugozitate ai inelelor utilizate pentru testarea blocurilor de compozite.

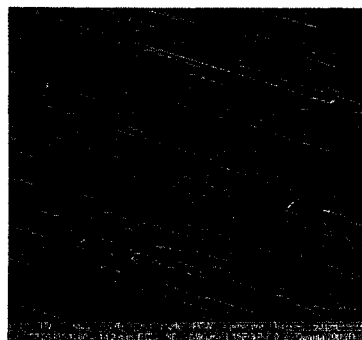


Fig. 5.20. Imagine SEM inel metallic după testarea GB10 în condițiile: $F = 5\text{ N}$, $v = 0,75\text{ m/s}$, $L = 7500\text{ m}$

Topografia inelelor a fost aproape insensibilă după testarea pe blocuri polimerice (PBT și PBT + PTFE), deși (și este verificat prin microscopie electronică), cel puțin parțial, localizat, apar aderări ale polimerului sau amestecului polimeric pe suprafața dură. În plus, sarcinile de pe inel sunt relativ mici, astfel încât să nu se distrugă asperitățile.

În figura 5.20 se observă doar un transfer insular de PBT pe inelul metalic, polimerul umplând văile texturii, nefiind uniform transferat și pe zona de vârf a acesteia.

5.6. Concluzii

S-a realizat un studiu comparativ între parametrii 2D și 3D pentru suprafețele neuzate și uzate ale blocurilor din PBT + 10% MSS, din care a rezultat că utilizarea setului de parametri 3D ales reflectă mai bine calitatea suprafeței, în condițiile de eșantionare ale metodologiei de investigație, propusă de autor.

S-a evaluat calitatea suprafețelor printr-un parametru adimensional, Sz/Sa, care reunește un parametru de mediere (Sa) și un parametru extrem (Sz), prin care se poate justifica de ce elemente singulare, cum ar fi asperitățile rare și foarte înalte, au o influență mare asupra comportării tribologice, mai ales pentru compozite cu elemente dure; valorile acestui parametru reflectă gradul de deteriorare al suprafeței.

Calitatea suprafețelor obținute prin injectare este influențată de materialele de adaos introduse în PBT. Astfel, adăugarea de microsferă de sticlă crește valoarea parametrilor 3D de rugozitate, fără a fi însă influențate în mod evident de proporția în care este adăugat în materialul de bază. Prin adăugarea de PTFE (atât în PBT, cât și în PBT + 10% MSS) se obține o scădere a valorii parametrilor 3D de rugozitate.

După testare, calitatea suprafețelor blocurilor din PBT și din amestec PBT + PTFE a fost cu mult mai bună decât cea a suprafeței inițiale, dar fără a se evidenția o tendință clară de evoluție a parametrilor 3D de rugozitate în funcție de procentul de material de adaos. Adaosul de microsferă de sticlă în PBT a avut o influență nesemnificativă asupra calității suprafețelor uzate față de calitatea suprafețelor inițiale. Creșterea procentului de microsferă de sticlă are ca efect o ușoară degradare a calității suprafețelor uzate. În cazul materialului compozit hibrid, calitatea suprafeței după testare a fost inferioară celei inițiale, dar valorile parametrilor 3D de rugozitate au fost comparabile cu cele ale compozitului PBT + 10% MSS.

În cazul studiat, pentru blocurile din PBT + 10% PTFE, pentru cele trei forțe și viteze testate și pentru distanța de alunecare $L = 7500$ m, nu s-a găsit o influență semnificativă a forțelor normale asupra calității suprafețelor testate.

Suprafețele metalice ale inelelor nu sunt prea mult afectate de materialele și parametrii de testare, fapt reflectat prin redușă variație a setului de parametri 3D ai rugozității studiat.

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

6.1. Concluzii finale

În urma analizei rezultatelor experimentale, pot fi trase următoarele concluzii:

1. Metodologia experimentală aplicată permite caracterizarea din punct de vedere mecanic și tribologic a materialelor pe bază de PBT investigate;

2. După efectuarea testelor mecanice s-au determinat caracteristici precum limita de rupere, modulul de elasticitate longitudinal și deformația relativă la rupere și s-a analizat influența concentrațiilor materialelor de adaos asupra acestor caracteristici;

3. Materialele pe bază de PBT studiate (compozite cu 10% și 20% microsferă de sticlă, amestecuri polimerice cu 5%, 10% și 15% PTFE și un compozit hibrid cu 10% microsferă de sticlă și 10% PTFE) prezintă bune proprietăți mecanice și tribologice; literatura consultată nu a oferit date sistematice despre acest material și mai ales despre comportarea tribologică;

4. Pentru fiecare regim de lucru (trei forțe normale de încărcare - 1 N, 2,5 N și 5 N, trei viteze de alunecare - 0,25 m/s, 0,5 m/s și 0,75 m/s și trei distanțe de alunecare - 2500 m, 5000 m și 7500 m) s-au identificat procesele tribologice din stratul superficial, acestea fiind specifice pentru fiecare clasă de materiale, datorită faptului că materialele de adaos induc procese de uzură diferite;

5. S-a constatat că PBT are o comportare tribologică foarte bună, cu coeficient mediu de frecare mic (doar puțin mai mare decât PTFE în aceleași condiții de testare) și o uzură relativ redusă;

6. Compozitele PBT + MSS au avut rata specifică de uzură mai bună decât PBT neaditivat, dar nu s-au obținut diferențe atât de mari ca în cazurile altor compozite polimerice cu același material de adaos;

7. Amestecurile polimerice au avut un coeficient mediu de frecare și o rată de uzură mai mici decât ale polimerului și al compozitelor (testate pe inel de oțel);

8. Compozitul hibrid PBT+10%MSS+10%PTFE a avut cea mai mică rată specifică de uzură, pentru un coeficient de frecare apropiat de al PBT;

6.2. Contribuții personale

1. Elaborarea unor rețete proprii de materiale pe bază de PBT (compozite cu MSS în diverse concentrații, amestecuri cu PTFE în diverse concentrații și un compozit hibrid PBT+10%MSS+10%PTFE).

2. Elaborarea și punerea în practică a unei metodologii experimentale de testare mecanică și tribologică pentru a evidenția influența materialelor de adaos și a parametrilor de testare (forță normală, distanță și viteză de alunecare).

3. Evaluarea comportării tribologice a materialelor obținute pe tribotesterul prismă-pe-inel, prin:

- studiul evoluției coeficientului de frecare în funcție de regimul de testare și de materialul blocului;

- studiul uzurii cuplei de frecare prin analiza parametrilor de uzură;

- studiul emisiei acustice;

- identificarea proceselor particulare din straturile superficiale ale blocului și inelului, utilizând metode nedistructive.

4. Găsirea unei concordanțe între nivelul emisiei acustice și limita de rupere, respectiv modulul de elasticitate longitudinal, pentru cele trei clase de materiale pe bază de PBT testate;

5. Găsirea unei dependențe liniare între volumul de uzură, respectiv lucrul mecanic de frecare și integrala tensiunii emisiei acustice și a valorilor constantelor de proporționalitate pentru toate materialele testate.

6. Modelarea cu elemente finite ale tribomodelului prismă-pe-inel și evidențierea existenței deformațiilor plastice, utilizând datele obținute din testarea la tracțiune a materialelor.

7. Utilizarea profilometriei 2D și 3D pentru evaluarea calității suprafețelor uzate, utilizând parametrii de amplitudine și parametrii funcționali.

8. Metodă proprie de evaluare a uzurii, prin realizarea unui program (în MATLAB) pentru calculul volumului urmei de uzură, pe baza fișierelor rezultate din înregistrările topografiei făcute cu un profilometru optic 3D.

6.3. Perspective de continuare a cercetărilor

1. Elaborarea altor rețete de materiale pe bază de PBT (compozite cu fibre scurte de sticlă, carbon sau aramidice, cu MoS_2 etc., în diverse concentrații și compozite hibride).

2. Optimizarea rețetelor de materiale pe bază de PBT cu ajutorul modelelor bazate pe rețele neuronale și aprecierea nivelurilor de influență a parametrilor de intrare ai testelor tribologice asupra celor de ieșire.

3. Studiul influenței temperaturii asupra comportării tribologice a materialelor compozite pe bază de PBT.

4. Realizarea unor modele finite pentru evaluarea stării de tensiuni și deformații din zona de contact (și cu luarea în considerare a câmpului termic), pentru materialele compozite pe bază de PBT și validarea rezultatelor experimentale.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [3] Akiyama M., Yamaguchi T., Matsumoto K., Hokkirigawa K., *Polymer Composites Filled with RB Ceramics Particles as Low Friction and High Wear Resistant Filler*, Tribology online, Vol. 5, No. 1, pp. 19-26, 2010.
- [18] Baranov V., Kudryavtsev E., Sarychev G., Schavelin V., *Acoustic Emission in Friction*, Elsevier, ISBN 978-0-08-045150-3, 2007.
- [22] Bartenev G.M., Lavrentev V.V., *Friction and Wear of Polymers*, Elsevier, ISBN: 044442000-2, 1981.
- [25] Benabdallah H. S., *Friction, wear and acoustic emissions of some plastics sliding against Si₃N₄*, Wear, Vol. 264, pp. 152-156, 2008.
- [27] Benabdallah H.S., *Tribological Properties and Acoustic Emissions of Some Thermoplastics Sliding Against SAE52100*, Journal of Tribology, Vol. 128, pp. 96-102, 2006.
- [28] Berthier Y., *Maurice Godet's Third Body*, in *The Third Body Concept Interpretation of Tribological Phenomena*, ISBN 0 444 82502, pp. 21-30, 1996.
- [42] Blunt De L., Jiang X., *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography*, London; Sterling, VA, Kogan Page Science, Elsevier, ISBN 1-90399611 2, 2003.
- [45] Boazu D., Gavrilescu I., *Contactul mecanic. Analiză cu elemente finite*, Editura EUROPLUS, Galați, ISBN (10) 973-7845-40-4; ISBN 978-973-7845-40-5, 2006.
- [47] Boțan M., Georgescu C., Deleanu L., *Influence of adding micro glass beads in a PBT matrix on the mechanical properties*, The 3rd International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems, DIPRE'12, 31 mai – 1 iunie, Galați, 2012.
- [48] Boțan M., Georgescu C., Dobrea D., Deleanu L., *Mechanical properties for blends of PBT and PTFE*, The 7th International Symposium KOD 2012, Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, 24/26 May, Balatonfüred, Hungary, 2012, <http://www.kod.ftn.uns.ac.rs/download/KOD2012list.doc>.
- [50] Brandrup J., Immergut E.H., Grulke E.A. (editori), *Polymer Handbook 4th Edition*, ISBN 978-047-116-628-3, pp. 144-155, pp. 184-244, 1998.
- [53] Briscoe B.J., Sinha S.K., *Wear of polymers*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Engineering Tribology, Vol. 216, pp. 401-413, 2002.
- [55] Briscoe B.J., *Wear of polymers: an essay on fundamental aspects*, Tribology International, Vol. 14, pp. 231-243, 1981.
- [57] Brown J., *Handbook of Polymer Testing - Short-Term Mechanical Tests*, Rapra Technology Limited, ISBN 1-85957-324-X, 2002.
- [59] Brydson J.A., *Plastics Materials*, 7th Edition, Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-4132-0, 1999.
- [65] Burris D.L., Sawyer W.G., *Tribological behavior of PEEK components with compositionally graded PEEK/PTFE surfaces*, Wear, Vol. 262, pp. 220-224, 2007.
- [69] Chanda M., Roy S.K., *Plastics Technology Handbook*, 4th Edition, 978-084-937-039-7 CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- [80] Crawford R.J., *Plastics Engineering*, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, ISBN 0-7506-3764-1, 2002.
- [81] Crețu S., *Contactul concentrat elastic-plastic*, Ed. "Politehniurn", Iași, ISBN 978-973-621-171-3, 2009.
- [85] Czichos H., Saito T., Smith L., *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*, Springer Science-Business Media, ISBN-10: 3-540-20785-6, 2006.

- [86] Czikos H. - *Tribology – A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, Elsevier Scientific Publishing Company, New-York, ISBN 0-444-41676-5, 1978.
- [88] Dasari A., Yu Z.-Z., Mai Y.-W., *Fundamental aspects and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites*, Materials Science and Engineering, Vol. 63, pp. 31-80, 2009.
- [98] Deleanu L., Andrei G., Maftai L., Georgescu C., Cantaragiu A., *Wear maps for a class of composites with polyamide matrix and micro glass spheres*, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 17, No 3, pp. 371-379, Bulgarian-English Academic Pub. House, Sofia, Bulgaria, ISSN 1310-4772, 2011, <http://scibulcom.net/jbtar.php?gd=2011&bk=3>.
- [99] Deleanu L., Cantaragiu A., Birsan I.G., Podaru G., Georgescu C., *Evaluation of the spread range of 3D parameters for coated surfaces*, Tribology in Industry, Vol. 33, No. 2, pp. 72-78, ISSN 2217-7965, 2011, <http://www.tribology.fink.rs/2011-2.html>.
- [100] Deleanu L., Cantaragiu A., Georgescu C., Bojan M., *Influence of Measured Samples on 3D Roughness Parameters*, Mechanical Testing and Diagnosis, Vol. 1, pp. 42-54, ISSN 2247-9635, 2011, http://www.om.ugal.ro/mtd/download/2011-1/5_MTD_Volume%201_2011_Deleanu.pdf
- [101] Deleanu L., Ciortan S., Maftai L., Petrică A., Cantaragiu A. Podaru G., *Interdisciplinary Approach of Tribological Test Program for Polymeric Composites*, The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați, Fascicle V, Technologies in Machine Building, NewTech 09, Galați, pp. 229-310, 2009.
- [102] Deleanu L., Georgescu C., Gheorghieș C., *Investigating Tribological Processes in Polymeric Composites*, The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați, Fascicle IX, Metallurgy and Material Science, No. 4 - 2011, pp. 5-15, ISSN 1453 - 083X, <http://www.fmet.ugal.ro/Anale/Anale%204-2011.pdf>.
- [103] Deleanu L., Georgescu C., Suciuc C., *A comparison between 2D and 3D surface parameters for evaluating the quality of surfaces*, The 3rd International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems, DIPRE'12, 31 mai – 1 iunie, Galați, 2012.
- [104] Deleanu L., Georgescu C., *Water lubrication of PTFE composites*, Industrial Lubrication and Tribology, ISSN 0036-8792, under review.
- [105] Deleanu L., Maftai L., Andrei G., Ciortan S., Cantaragiu A., *3D Functional parameters characterising composite surface after pin-on-disc tests in dry regim*, International Symposium on Applied Physics, Materials Science, Environment and Health, ISAP 1st Edition, Galați, 2009.
- [107] Demkin N.B., Izmailov V.V., *The Relation between the Friction Contact Performance and the Microgeometry of Contacting Surfaces*, Journal of Friction and Wear, Vol. 31, No. 1, pp. 48-55, 2010.
- [108] Deshmukh G.S., Peshwe D.R., Pathak S.U., Ekhe J.D., *A study on effect of mineral additions on the mechanical, thermal, and structural properties of poly(butylene terephthalate) (PBT) composites*, J Polym Res, Vol. 18, pp.1081-1090, 2011.
- [109] Deshmukh G.S., Peshwe D.R., Pathak S.U., Ekhe J.D., *Evaluation of mechanical and thermal properties of Poly (butylene terephthalate) (PBT) composites reinforced with wollastonite*, Transactions of The Indian Institute of Metals, Vol. 64, No. 1 & 2, pp. 127-132, 2011.
- [117] Evans D. C., Lancaster J. K., *The Wear of Polymers*, Treatise on Materials Science and Technology, Vol. 13, Wear, Academic Press inc., New York, 1979.
- [124] Friedrich K., *Advances in Composite Tribology*, Vol. 8, Composites Materials Series, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany, 1993.
- [127] Friedrich K., Schlarb A.K., *Tribology of Polymeric Nanocomposites – Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings*, Tribology and Interface Engineering Series, 55, Elsevier, ISBN: 978-0-444-53155-1, Part I: Bulk Composites with Spherical Nanoparticles, pp. 17-148, 2008.
- [131] Friedrich K., Zhang Z., Schlarb A.K., *Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites*, Composites Science and Technology, Vol. 65, pp. 2329-2343, 2005.

- [132] Frunză G., Spînu S., *Fundamentele teoriei plasticității. Aplicații în mecanica contactului elasto-plastic*, Ed. Universității "Ștefan cel Mare", Suceava, ISBN 978-973-666-336-9, 2010.
- [136] Fung C.-P., Kang P.-C., *Multi-response optimization in friction properties of PBT composites using Taguchi method and principle component analysis*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 170, pp. 602-610, 2005.
- [139] Georgescu C., Boazu D., Ștefănescu I., Deleanu L., *An isothermal model for evaluating stress and strain in the polymeric block of the block-on-ring system*, The 3rd International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems, DIPRE'12, 31 mai – 1 iunie, Galați, 2012.
- [140] Georgescu C., Deleanu L., Boțan M., *Dry sliding of composites with PBT matrix and micro glass beads on steel*, Industrial Lubrication and Tribology, ISSN 0036-8792, under review.
- [141] Georgescu C., Deleanu L., *Friction and Wear of Polybutylene Terephthalate against Steel in Block-on-Ring Tests*, The Annals of „Dunărea de Jos” University of Galați, Fascicle VIII, Tribology, (XVII), Issue 2, ISSN 1221-4590, 2011, <http://www.om.ugal.ro/AnnalsFasc8Tribology/index.htm>.
- [142] Georgescu C., Deleanu L., *Influence of PTFE Concentration on the Tribological Characteristics of PBT*, The 7th International Symposium KOD 2012, Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, 24/26 May, Balatonfured, Hungary, 2012. <http://www.kod.ftn.uns.ac.rs/download/KOD2012list.doc>
- [143] Georgescu C., Deleanu L., *Influence of the Sliding Distance for PBT-Steel Dry Contact*, 11th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry", RaDMI 2011, 15 - 18 September, Sokobanja, Serbia, pp. 179-185, ISBN 978-86-6075-027-5, 2011.
- [144] Georgescu C., Deleanu L., *Wear and friction of PBT-based material in dry sliding against steel*, 15th International Conference on Experimental Mechanics, Tribology in Mechanical Components and Machine Elements, Universidade do Porto, Portugal, 22-27 July 2012, http://paginas.fe.up.pt/clme/icem15/ICEM15_FinalProgram.pdf
- [145] Georgescu C., Șolea R., Deleanu L., *Using 3D non-contact profilometry for evaluating the wear tracks*, The 3rd International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems, DIPRE'12, 31 mai – 1 iunie, Galați, 2012.
- [146] Georgescu C., Ștefănescu I., Boțan M., Deleanu L., *Friction and wear of polybutylene terephthalate against steel in block-on-ring tests*, Revista de Materiale Plastice, ISSN 0025-5289, <http://www.revmaterialoplastice.ro/>, în curs de apariție.
- [153] Grădinaru D., *Modelări numerice în teoria contactului elastic*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, ISBN 978-973-30-1863-6, 2007.
- [160] Harper C.A., *Handbook of Plastics Technologies – The Complete Guide to Properties and Performance*, The McGraw-Hill Companies, ISBN: 9780071460682, 2006.
- [172] Hubca G., Tomescu M., Novac O.A., Iovu H., Roșca' D., Ivănuș G., *Materiale compozite*, Ed. Tehnică, București, ISBN 973-31-1126-0, 1999.
- [176] Ilie F., *Tribologia straturilor subțiri formate prin transfer selectiv*, Ed. Tehnică, București, ISBN: 9733121363, 2002.
- [179] Johnson K. L., *Contacts Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, ISBN-13: 978-0521347969, 1987.
- [188] Khurshudov A.G., Talke F.E., *A study of sub ambient pressure tri/Pad sliders using acoustic emission*, ASME J. Tribology, Vol. 120, pp. 54-59, 1998.
- [189] Kim J. Y., *Poly(butylene terephthalate) Nanocomposites Containing Carbon Nanotube*, pp. 707-726, in *Advances in Nanocomposites - Synthesis, Characterization and Industrial Applications*, Boreddy S. R. Reddy (editor), InTech, Croatia, ISBN 978-953-307-165-7, 2011.

- [191] Klaas N.V., Marcus K., Kellock C., *The tribological behaviour of glass filled polytetrafluoroethylene*, Tribology International, Vol. 38, pp. 824-833, 2005.
- [202] Lahiri J., Paul A., *Effect of interface on the mechanical behaviour of glass bead-filled PVC*, Journal of Materials Science, Vol. 20, pp. 2253-2259, 1985.
- [209] Le Blanc J., *Filled Polymers. Science and Industrial Applications*, Taylor & Francis Group, ISBN 978-1-4398-0042-3, 2010.
- [210] Leach R., *Optical Measurement of Surface Topography*, Springer, e-ISBN 978-3-642-12012-1, 2011.
- [221] Lingard C.W., Yu C.W., Yau C.F., *Sliding wear studies using acoustic emission*, Wear, Vol. 162-164, Part A, pp. 597-604, 1993.
- [223] Lu Z.P., Friedrich K., *On sliding friction and wear of PEEK and its composites*, Wear, Vol. 181-183, Part 2, pp. 624-631, 1995.
- [226] Malburg M.C., *Cylinder Bore Surface Texture Analysis*, Digital Metrology Solutions Inc., 2002, disponibil on-line: <http://www.digitalmetrology.com/Papers/CylinderBoreNoBkgd.pdf>
- [234] Meddad A., Fisa B., *Filler-matrix debonding in glass bead-filled polystyrene*, Journal of Materials Science, Vol. 32, pp. 1177-1185, 1997.
- [235] Mikitaev A.K., Ligidov M.K., Zaikov G.E., *Polymers, Polymer Blends, Polymer Composites and Filled Polymers: Synthesis, Properties and Applications*, Nova Science Publishers Inc., ISBN 978-1-60876-238-5, New York, 2006.
- [237] Miracle D.B., Donaldson S.L., *ASM Handbook, Volume 21 - Composites*, ASM International, ISBN 0-87170-703-9, 2001.
- [243] Muralikrishnan B., Raja J., *Computational Surface and Roundness Metrology*, Springer, e-ISBN 978-1-84800-297-5, 2009.
- [244] Myshkin N.K., Petrokovets M.I., Kovalev A.V., *Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer*, Tribology International, Vol. 38, pp. 910-921, 2005.
- [260] Rabinowicz E., *Friction and wear of materials*, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., New York, ISBN 0-471-83084-4, 1995.
- [265] Rîpă M., Deleanu L., *Deteriorări în tribosisteme*, Editura Zigotto, Galați, ISBN 978-973-1724-65-2, 2008.
- [266] Rîpă M., Deleanu L., *Elemente de tribologie*, Editura Fundației Universitare „Dunărea de Jos”, Galați, ISBN 973-627-104-8, 2004.
- [273] Samyn P., De Baets P., Schoukens G., Van Peteghem A.P., *Large-scale tests on friction and wear of engineering polymers for material selection in highly loaded sliding systems*, Materials and Design, Vol. 27, pp. 535-555, 2006.
- [275] Samyn P., Quintelier J., Ost W., De Baets P., Schoukens G., *Sliding behaviour of pure polyester and polyester-PTFE filled bulk composites in overload conditions*, Polymer Testing, Vol. 24, pp. 588-603, 2005.
- [295] Sinha S.K., Briscoe B.J., *Polymer Tribology*, Imperial College Press, ISBN 978-1-84816-202-0, 2009.
- [304] Stachowiak G.W., (editor), *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*, John Wiley & Sons Ltd, England, ISBN 978-0-470-01628-2, 2005.
- [305] Stachowiak G.W., Batchelor A.W., *Engineering Tribology*, Butterworth-Heinemann, ISBN 978-075-067-304-4, 2002.
- [310] Stout K.J., Blunt L., *Three-Dimensional Surface Topography*, Second Edition, Penton Press, Kogan Page, London, ISBN 1-85718-026-7, 1994.
- [316] Ștefănescu F., Neagu G., Mihai A., *Materialele viitorului se fabrică azi. Materiale compozite*, Ed. Didactică și Pedagogică R.A., București, ISBN 973-30-4628-0, 1996.

- [317] Ștefănescu I., Diaconu N., *Practica lubrifierii tribosistemelor industriale*, Editura Europlus, Galați, ISBN 978-973-1950-59-4, 2009.
- [321] Tarău I., Tomescu (Delcanu) L., Georgescu C., *Analiza curbelor Abbott-Firestone pentru compozite cu matrice de PTFE și fibră de sticlă*, Conf. Inter., Tehnologii moderne, calitate și restructurare, Chișinău, Vol. II, pp. 464-467, 2001.
- [326] Tomescu L., Georgescu C., *Aspecte ale uzurii compozitelor cu matrice de PTFE, la alunecare în apă pe oțel*, Conferința VAREHD 10, 20-21 octombrie, Suceava, Romania, 2000.
- [328] Tomescu L., Rîpă M., Vasilescu E., Georgescu C., *Surface Profiles of Composites with PTFE Matrix*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 143-144, pp. 384-389, ISSN 0924-0136, 2003, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603004059>.
- [329] Tomescu L., Tarău I., Georgescu C., *Studiu al suprafeței compozitelor cu matrice de PTFE și fibre de sticlă, după alunecare în apă, folosind metoda Taguchi*, Conf. Inter., Tehnologii moderne, calitate și restructurare, Chișinău, Vol. II, pp. 468-471, 2001.
- [332] Tudor A., *Contactul real al suprafețelor de frecare*, Editura Academiei Române, București, 1990.
- [333] Tudor A., *Frecarea și uzura materialelor*, Editura Bren, 2002.
- [340] Wang H., Feng X., Shi Y., Lu X., *Effects of fibrous fillers on friction and wear properties of polytetrafluoroethylene composites under dry or wet conditions*, China Particology, Vol. 5, pp. 414-419, 2007.
- [346] Whitehouse D. J., *Surfaces and their Measurement*, Taylor Hobson Ltd, ISBN 1 9039 9601 5, 2002.
- [350] Wu J., Wang K., Yu D., *Fracture toughness and fracture mechanisms of PBT/PC/IM blends. Part V Effect of PBT-PC interfacial strength on the fracture and tensile properties of the PBT/PC blends*, Journal of Material Science, Vol. 38, pp. 183-191, 2003.
- [359] Xin F., Xiaosong D., Yijun S., Huaiyuan W., Shenghua S., Xiaohua L., *A study on the friction and wear behavior of polytetrafluoroethylene filled with potassium titanate whiskers*, Wear, Vol. 261, pp. 1208-1212, 2006.
- [362] Yamaguchi Y. – *Tribology of Plastic Materials – Their Characteristics and Applications to Sliding Components*, Tribology Series, Vol. 16, Elsevier Science Publishers B.V., ISBN 0-444-87445-3, 1990.
- [365] Yang W., Liu Z.-Y., Shan G.-F., Li Z.-M., Xie B.-H., Yang M.-B., *Study on the melt flow behavior of glass bead filled polypropylene*, Polymer Testing, Vol. 24, pp. 490-497, 2005.
- [370] Zhang C., Dai G., *Mechanical properties and reactions of PBT/PTW blends*, Journal of Materials Science, Vol. 42, pp. 9947-9953, 2007.
- [377] Zhang X.R., Pei X.Q., Wang Q.H., *Friction and wear studies of polyimide composites filled with short carbon fibers and graphite and micro SiO₂*, Materials and Design, Vol. 30, pp. 4414-4420, 2009.
- [378] Zhang Z., Breidt C., Chang L., Friedrich K., *Wear of PEEK composites related to their mechanical performances*, Tribology International, Vol. 37, pp. 271-277, 2004.
- [382] Zhil'tsova T.V., Neto V.F., Fonseca A., Oliveira M.S.A., *Numerical Simulation of a PBT Component with Molded-in Metal Insert*, PMI 2008 – 3rd International Conference on Polymers & Moulds Innovations, University College Ghent, Belgium, pp. 1-6, 2008.
- [383] *** Arnite® PBT and PET Polyesters, disponibil on-line:
http://www.dsm.com/en_US/html/dep/arnite.htm
- [384] *** ASM International, *Characterization and Failure Analysis of Plastics*, ISBN: 0-87170-789-6, 2003.
- [385] *** ASME B46 Committee – Surface Texture – Panel Discussion, disponibil on-line:
<http://cstools.asme.org/csconnect/pdf/CommitteeFiles/21762.pdf>

- [386] *** ASME B46.1-2002; Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay). Revision of ANSI/ASME B46.1-1995: General description of profile parameters and fractal dimension.
- [387] *** ASTM D1525 - 2009 Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics
- [388] *** ASTM D638 - 10 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
- [389] *** ASTM D648-07 Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics under Flexural Load in the Edgewise Position
- [390] *** CETR UMT Multi-Specimen Test System, Hardware Manual, 2007.
- [391] *** CETR UMT Multi-Specimen Test System, Software Operating Manual, Version 1.116, Build 222, 2007.
- [392] *** CETR UMT-2 Multi-Specimen Test System, Viewer Manual, Version 2.14 Build 77, 2007.
- [393] *** *Composite Materials Handbook - Volume 3, Polymer Matrix Composites, Materials Usage, Design, and Analysis*, MIL-HDBK-17-3F, DOD, 2002.
- [394] *** COSMOS M 2.9 Manuals
- [395] *** Crastin PBT. Molding Guide, disponibil on-line:
http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/assets/downloads/processing/cramge.pdf
- [396] *** DuPont Engineering Polymers. Blow Moulding of Technical Components, disponibil on-line:
http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/assets/downloads/processing/BM_PM_e.pdf
- [397] *** DuPont Engineering Polymers. Blow Moulding Processing Manual, disponibil on-line:
http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/assets/downloads/processing/BM_PM_e.pdf
- [398] *** DuPont. Crastin® PBT. Thermoplastic polyester resin Crastin® 6130 NC010, disponibil on-line: <http://plastics.dupont.com/plastics/dsheets/crastin/CRASTIN6130NC010.pdf>
- [399] *** DuPont™ Crastin®. Thermoplastic polyester resin. PRODUCT AND PROPERTY GUIDE, disponibil on-line: <http://plastics.dupont.com/plastics/pdf/europe/crastin/CRAPPe.pdf>
- [400] *** DuPont™ Engineering Polymers Failure Analysis using Microscopic Techniques, disponibil on-line: http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/assets/downloads/design/failureanalysis.pdf
- [401] *** DuPont™ Engineering Polymers. Extrusion Applications, disponibil on-line:
http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/assets/downloads/processing/extru_an.pdf
- [402] *** DuPont™ Engineering Polymers. General Design Principles – Module I, disponibil on-line:
<http://www.plastics.dupont.com/plastics/pdf/europe/markets/L12565e.pdf>
- [403] *** General Design Principles for DuPont Engineering Polymers, disponibil on-line:
http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/assets/downloads/design/H76838.pdf
- [404] *** Gwyddion – Free SPM data analysis software, Gwyddion user guide, disponibil on-line:
<http://gwyddion.net/documentation/>
- [405] *** ISO 11562:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Metrological characteristics of phase correct filters
- [406] *** ISO 12085:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Motif parameters
- [407] *** ISO 1302: Geometrical product specification (GPS), surface composition: tactile slice procedure: Definition of the filter for roughness profile computation.
- [408] *** ISO 13565-1: 1996 Geometric product specifications (GPS) - Surface texture: profile method - surfaces having stratified functional properties - Part 1.
- [409] *** ISO 13565-2: 1996 Geometric product specifications (GPS) - Surface texture: profile method - surfaces having stratified functional properties - Part 2. Height characterization using the linear material ratio curve: Definition of the material ratio curve.
- [410] *** ISO 25178-2 Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Areal. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters: Definition of surface texture parameters
- [411] *** ISO 25178-6: Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Areal. Part 6: Classification of methods for measuring surface texture

- [412] *** ISO 4287: Geometrical product specification (GPS), surface composition: tactile slice procedure: Standard for definition of general roughness parameters
- [413] *** ISO 4288:2002 Geometrical product specification (GPS), Surface texture: Rules and procedures for the assessment of surface texture
- [414] *** ISO 527 and ASTM D638 – explaining the difference, Zwick GmbH & Co. KG., disponibil on-line: http://lab.arcada.fi/plastic%20lab/manuals_links/difference%20between%20ISO%20and%20ASTM%20standards.pdf, 2006.
- [415] *** ISO 75-2:2004 Plastics. Determination of temperature of deflection under load. Part 2: Plastics and ebonite
- [416] *** Mase plastice tehnice generale și avansate, Catalog de produse CEPROINV SA Focșani, <http://www.ceproinv.ro>
- [417] *** NanoFocus AG μScan® – Instruction Manual
- [418] *** Polybutylene Terephthalate (PBT), disponibil on-line: <http://www.rtpcompany.com/info/guide/descriptions/1000.htm>
- [419] *** Polymers Selector. Polymer Properties, disponibil on-line: <http://www.omnexus.com/to/polymerselector/polymerprofiles.aspx>
- [420] *** POTICON TISMO Reinforced Compound, disponibil on-line: <http://www.otsukac.co.jp/en/products/chemical/poticon/>
- [421] *** *Properties and Performance of Polymer-Matrix Composites, ASM Handbook*, Vol. 21, ISBN 0-87170-703-9, 2001.
- [422] *** Quadrant Engineering Plastic Production – Design and Fabrication Reference Guide, disponibil on-line: <http://www.quadrantpp.com>
- [423] *** Solvay Advanced Polymers Data Sheet, disponibil on-line: <http://solvayadvancedpolymers.com>
- [424] *** SPIP The Scanning Probe Image Processor SPIP™, Version 5.1.11, 2012, disponibil on-line: <http://www.imagemet.com/WebHelp/spip.htm>
- [425] *** SR EN ISO 527-1:2000 Materiale plastice. Determinarea proprietăților de tracțiune. Partea 1: Principii generale
- [426] *** SR EN ISO 527-2:2000 Materiale plastice. Determinarea proprietăților de tracțiune. Partea 2: Condiții de încercare a materialelor plastice pentru injecție și extrudare
- [427] *** SR EN ISO 75-1:2004: Materiale plastice. Determinarea temperaturii de încovoiere sub sarcină. Partea 1: Metoda generală de încercare
- [428] *** SR ISO 4287/A 99:2003 Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters
- [429] *** Standard for Safety of Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances testing - UL site, general description of UL94 tests, disponibil on-line: <http://www.ul.com/global/eng/pages/offering/industries/chemicals/plastics/testing/flame/>
- [430] *** Ticona – PBT grades, disponibil on-line: <http://tools.ticona.com/tools/mcbasi/product-tools.php?sPolymer=PBT&sProduct=CELANEX>
- [431] *** Ultradur® Thermoplastic Polyester, disponibil on-line: <http://www.plasticsportal.com/products/ultradur.html>
- [432] *** ULTRADUR®, Polybutylene terephthalate (PBT), disponibil on-line: <http://www2.basf.us//PLASTICSWEB/displayanyfile?id=0901a5e1800bc1a9>
- [433] *** Valox PBT Resin, disponibil on-line: <http://www.sabic-ip.com/gepapp/Plastics/servlet/ProductsAndServices/Product/series?sltPrdline=Valox&sltPolymer=PBT&search=Search#searchresults>
- [434] *** Virgin PTFE powders, disponibil on-line: <http://www.flontech.com/index.php/products.html>
- [435] *** WinTest™ Analysis universal testing software, Help Version 1.0.3.

LISTA LUCRĂRILOR REZULTATE ÎN URMA CERCETĂRILOR EFECTUATE PENTRU ELABORAREA TEZEI DE DOCTORAT

- [1] **Georgescu C.**, Boazu D., Ștefănescu I., Deleanu L., *An isothermal model for evaluating stress and strain in the polymeric block of the block-on-ring system*, The 3rd International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems, DIPRE'12, 31 mai – 1 iunie, Galați, 2012.
- [2] **Georgescu C.**, Deleanu L., Boțan M., *Dry sliding of composites with PBT matrix and micro glass beads on steel*, Industrial Lubrication and Tribology, ISSN 0036-8792, under review.
- [3] **Georgescu C.**, Deleanu L., *Friction and Wear of Polybutylene Terephthalate against Steel in Block-on-Ring Tests*, The Annals of „Dunărea de Jos” University of Galați, Fascicle VIII, Tribology, (XVII), Issue 2, ISSN 1221-4590, 2011, <http://www.om.ugal.ro/AnnalsFasc8Tribology/index.htm>.
- [4] **Georgescu C.**, Deleanu L., *Influence of PTFE Concentration on the Tribological Characteristics of PBT*, The 7th International Symposium KOD 2012, Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, Balatonfüred, Hungary, pp. 405-410, ISBN 978-86-7892-399-9, 2012, <http://www.kod.ftn.uns.ac.rs/download/KOD2012list.doc>
- [5] **Georgescu C.**, Deleanu L., *Influence of the Sliding Distance for PBT-Steel Dry Contact*, 11th International Conference “Research and Development in Mechanical Industry”, RaDMI 2011, Sokobanja, Serbia, pp. 179-185, ISBN 978-86-6075-027-5, 2011.
- [6] **Georgescu C.**, Deleanu L., *Wear and friction of PBT-based material in dry sliding against steel*, 15th International Conference on Experimental Mechanics, Tribology in Mechanical Components and Machine Elements, Universidade do Porto, Portugal, 22-27 July 2012, http://paginas.fe.up.pt/clme/icem15/ICEM15_FinalProgram.pdf
- [7] **Georgescu C.**, Șolea R., Deleanu L., *Using 3D non-contact profilometry for evaluating the wear tracks*, The 3rd International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems, DIPRE'12, 31 mai – 1 iunie, Galați, 2012.
- [8] **Georgescu C.**, Ștefănescu I., Boțan M., Deleanu L., *Friction and wear of polybutylene terephthalate against steel in block-on-ring tests*, Revista de Materiale Plastice, ISSN 0025-5289, <http://www.revmaterialeplastice.ro/>, în curs de apariție.
- [9] Deleanu L., Andrei G., Maftei L., **Georgescu C.**, Cantaragiu A., *Wear maps for a class of composites with polyamide matrix and micro glass spheres*, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 17, No 3, pp. 371-379, Bulgarian-English Academic Pub. House, Sofia, Bulgaria, ISSN 1310-4772, 2011, <http://scibulcom.net/jbtar.php?gd=2011&bk=3>

- [10] Deleanu L., Cantaragiu A., Bîrsan I.G., Podaru G., **Georgescu C.**, *Evaluation of the spread range of 3D parameters for coated surfaces*, Tribology in Industry, Vol. 33, No. 2, pp. 72-78, ISSN 2217-7965, 2011, <http://www.tribology.fink.rs/2011-2.html>.
- [11] Deleanu L., Cantaragiu A., **Georgescu C.**, Boțan M., *Influence of Measured Samples on 3D Roughness Parameters*, Mechanical Testing and Diagnosis, Vol. 1, pp. 42-54, ISSN 2247-9635, 2011, http://www.om.ugal.ro/mtd/download/2011-1/5_MTD_Volume%201_2011_Deleanu.pdf
- [12] Deleanu L., **Georgescu C.**, Gheorghieș C., *Investigating Tribological Processes in Polymeric Composites*, The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați, Fascicle IX, Metallurgy and Material Science, No. 4 - 2011, pp. 5-15, ISSN 1453 - 083X, <http://www.fmet.ugal.ro/Anale/Anale%204-2011.pdf>.
- [13] Deleanu L., **Georgescu C.**, Suciuc C., *A comparison between 2D and 3D surface parameters for evaluating the quality of surfaces*, The 3rd International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems, DIPRE'12, 31 mai – 1 iunie, Galați, 2012.
- [14] Deleanu L., **Georgescu C.**, *Water lubrication of PTFE composites*, Industrial Lubrication and Tribology, ISSN 0036-8792, under review.
- [15] Boțan M., **Georgescu C.**, Deleanu L., *Influence of adding micro glass beads in a PBT matrix on the mechanical properties*, The 3rd International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems, DIPRE'12, 31 mai – 1 iunie, Galați, 2012.
- [16] Boțan M., **Georgescu C.**, Dobrea D., Deleanu L., *Mechanical properties for blends of PBT and PTFE*, The 7th International Symposium KOD 2012, Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, Balatonfüred, Hungary, pp. 531-536, ISBN 978-86-7892-399-9, 2012, <http://www.kod.ftn.uns.ac.rs/download/KOD2012list.doc>.
- [17] Tomescu L., Rîpă M., Vasilescu E., **Georgescu C.** – *Surface Profiles of Composites with PTFE Matrix*, Journal of Materials Processing Technology, ISSN 0924-0136, Vol. 143-144, Elsevier, pag. 384-389, 2003, factor de impact - 1.12878, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603004059>.

263702

