

**Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați**

**Școala doctorală de Inginerie**



# **TEZĂ DE DOCTORAT**

## **REZUMAT**

### **CONTRIBUȚII PRIVIND STUDIUL COMPORTĂRII LA UZURĂ A UNOR COMPOZITE CU MATRICE POLIMERICĂ DESTINATE RECONDIȚIONĂRII PIESELOR METALICE**

**Doctorand,**

**Ing. Virgil Iliuță**

**Conducător științific,**

**Prof. univ. dr. ing. Gabriel Andrei**

**Seria I6 Nr. 19**

**GALAȚI**

**2014**



**Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați**

**Școala doctorală de Inginerie**



# **TEZĂ DE DOCTORAT**

## **REZUMAT**

### **CONTRIBUȚII PRIVIND STUDIUL COMPORTĂRII LA UZURĂ A UNOR COMPOZITE CU MATRICE POLIMERICĂ DESTINATE RECONDIȚIONĂRII PIESELOR METALICE**

**Doctorand**

**Ing. Virgil Iliuță**

**Conducător științific,  
Referenți științifici**

Prof. univ. dr. ing. Gabriel Andrei  
Prof. univ. dr. ing. Filip Ilie  
Prof. univ. dr. ing. Dan Săvescu  
Prof. univ. dr. ing. Minodora Rîpă

**Seria I6 Nr. 19**

**GALAȚI**

**2014**

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

Domeniul **ȘTIINȚE INGINEREȘTI**

Seria I 1: **Biotehnologii**

Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**

Seria I 3: **Inginerie electrică**

Seria I 4: **Inginerie industrială**

Seria I 5: **Ingineria materialelor**

Seria I 6: **Inginerie mecanică**

Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**

Seria I 8: **Ingineria sistemelor**

Domeniul **ȘTIINȚE ECONOMICE**

Seria E 1: **Economie**

Seria E 2: **Management**

Domeniul **ȘTIINȚE UMANISTE**

Seria U 1: **Filologie- Engleză**

Seria U 2: **Filologie- Română**

Seria U 3: **Istorie**

C 6943/31.07.2014

Către

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați vă face cunoscut că, în data de 9.10.2014, ora 11<sup>00</sup>, în Sala D12 a Facultății de Inginerie, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată: „**CONTRIBUȚII PRIVIND STUDIUL COMPORTĂRII LA UZURĂ A UNOR COMPOZITE CU MATRICE POLIMERICĂ DESTINATE RECONDIȚIONĂRII PIESELOR METALICE**”, elaborată de doamna/domnul **ILIUȚĂ VIRGIL**, 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. Iulian-Gabriel BÎRSAN**  
Rector - Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
- 2. Conducător de doctorat** **Prof.univ.dr.ing. Gabriel ANDREI**  
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
- 3. Referent oficial** **Prof.univ.dr.ing. Filip ILIE**  
Universitatea POLITEHNICA din București
- 4. Referent oficial** **Prof.univ.dr.ing. Dan SĂVESCU**  
Universitatea TRANSILVANIA din Brașov
- 5. Referent oficial** **Prof.univ.dr.ing. Minodora RÎPĂ**  
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat, și vă 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, e-mail rectorat@ugal.ro.

Prof. **dr. ing. Iulian Gabriel BÎRSAN**



# CUVÂNT ÎNAINTE

Teza de față este rezultatul studiilor și cercetărilor desfășurate de doctorand în ultimii ani sub conducerea conducătorului de doctorat, domnul prof. univ. dr. ing. Gabriel ANDREI, căruia îi adresez mulțumiri pe această cale, pentru sprijinul acordat și înțelegerea manifestată pe parcursul elaborării acestei lucrări.

Îmi exprim, cu această ocazie, întreaga mea grațitudine față de doamna prof. univ. dr. ing. Minodora RÎPĂ pentru susținerea și sprijinul acordat în toată activitatea de realizare a tezei, pentru sugestiile prețioase oferite, amabilitate, promptitudine și generozitate.

Alese mulțumiri și recunoștință aduc doamnei dr. ing. Adriana PREDA, cercetător la SC Uzinsider engineering SA Galați, pentru sprijinul material și logistic acordat în desfășurarea cercetărilor.

Țin să mulțumesc membrilor comisiei de îndrumare, pe care i-am simțit alături de mine, pe parcursul stagiului: prof. univ. dr. ing. Iulian-Gabriel BÎRSAN, conf. dr. ing. Constantin SPĂNU și conf. dr. ing. Sorin CIORTAN. Sfaturile și sprijinul lor sunt de neprețuit și le voi rămâne mereu recunoscător.

Adresez sincere mulțumiri colegilor de departament pentru încurajări și sprijin moral și, în mod special, colegilor ș.l. dr. ing. Alexandru NĂSTASE și ș.l. dr. ing. Constantin GEORGESCU.

Le mulțumesc, totodată, colegilor: ș.l. dr. ing. Cornel SUCIU de la Universitatea „Ștefan cel Mare” Suceava, ș.l. dr. Tiberiu LAURIAN de la Universitatea Politehnica București, ș.l. dr. ing. Petrică ALEXANDRU și dr. fiz. Alina-Mihaela Cantaragiu de la Universitatea ”Dunărea de Jos” din Galați pentru amabilitatea și sprijinul acordat în realizarea unor experimente.

Calde mulțumiri aduc membrilor comisiei pentru evaluarea și susținerea publică a tezei: prof. univ. dr. ing. Filip ILIE de la Universitatea Politehnica București, prof. univ. dr. ing. Dan SĂVESCU de la Universitatea Transilvania Brașov, prof. univ. dr. ing. Minodora RÎPĂ de la Universitatea ”Dunărea de Jos” din Galați. Le sunt recunoscător pentru amabilitatea și bunăvoința de-a face parte din această comisie, pentru efortul făcut cu această ocazie.

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei mele, părinților mei, rudelor și prietenilor căroră, pe parcursul elaborării acestei teze, le-am oferit mai puțin din timpul meu. Dragostea și căldura lor, susținerea necondiționată și, mai ales, răbdarea lor au constituit un imbold să duc această lucrare la bun sfârșit.

Mulțumesc, de asemenea, tuturor celor care și-au făcut timp să arunce o privire asupra conținutului acestei lucrări și să facă observații critice în scopul îmbunătățirii ei.

Galați,  
Octombrie 2014

Ing. Virgil Iliuță

## CUPRINS

	Teză	Rezumat
Cuvânt înainte .....	I	I
Cuprins .....	III	III
Introducere .....	VII	V
Introduction .....	IX	
Notății și abrevieri .....	1	
Listă figuri .....	3	
Listă tabele .....	10	
<b>Capitolul 1 - Stadiul actual al cercetărilor privind comportarea tribologică a materialelor compozite polimerice</b> .....	<b>11</b>	<b>1</b>
1.1. Materiale compozite – generalități .....	11	1
1.1.1. Definierea materialelor compozite .....	11	1
1.1.2. Clasificarea materialelor compozite .....	11	1
1.1.3. Materiale de ranforsare sub formă de fibre .....	13	2
1.1.4. Materiale de ranforsare pulverulente .....	14	2
1.1.5. Materiale de adaos (fileri) .....	15	3
1.1.6. Tendințe actuale în realizarea și utilizarea compozitelor polimerice .....	16	3
1.2. Mecanisme de uzură specifice materialelor polimerice și compozitelor cu matrice organică .....	17	4
1.2.1. Tipuri de uzură specifice materialelor plastice și compozitelor cu matrice polimerică .....	17	4
1.2.2. Studii și cercetări privind uzura compozitelor polimerice .....	20	5
1.2.3. Cercetări privind testarea materialelor în mișcare alternativă rectilinie în configurația bilă-pe-plan .....	24	8
1.2.4. Cercetări privind caracterizarea materialelor prin zgâriere .....	28	9
1.2.5. Cercetări privind utilizarea rețelelor neuronale în modelarea proceselor tribologice ale compozitelor polimerice .....	33	11
1.3. Standardizarea încercărilor la uzură în configurația bilă-pe-plan și știft-pe-disc .....	36	
1.4. Proiectarea testelor de laborator .....	37	
1.5. Tipuri de tribomodele și metodologia de testare a tribosistemelor de alunecare .....	38	
1.6. Obiectivele tezei .....	39	13
1.7. Strategia cercetării .....	39	13
<b>Capitolul 2 – Metodologia de cercetare și echipamentele utilizate</b> .....	<b>41</b>	<b>14</b>
2.1. Materialele supuse investigațiilor .....	41	14
2.1.1. Caracterizarea materialelor compozite .....	43	15
2.1.2. Caracterizarea materialelor metalice supuse recondiționării .....	45	17
2.2. Probele testate și tehnologia de realizare a acestora .....	47	17
2.3. Programele de testare tribologică în regim uscat .....	48	18
2.4. Echipamentele de cercetare utilizate .....	49	19
2.4.1. Aparatură de testare tribologică în regim uscat .....	49	19
2.4.2. Echipament pentru analiza morfologică .....	51	20
2.5. Concluzii .....	54	22

<b>Capitolul 3 – Teste experimentale privind comportarea tribologică în regim uscat</b> .....	56	23
3.1. Rezultate experimentale privind coeficientul de frecare .....	56	23
3.1.1. Calculul presiunii de contact bilă-plan .....	56	23
3.1.2. Evoluția coeficientului de frecare în configurația bilă-pe-plan în mișcare rectilinie alternativă .....	58	25
3.1.3. Comparație privind coeficientul de frecare mediu în funcție de metoda de testare .....	64	29
3.2. Rezultate experimentale privind parametrii de uzură .....	67	30
3.2.1. Generalități .....	67	30
3.2.2. Rezultate privind parametrii de uzură .....	68	31
3.3. Analiza profilometrică .....	71	34
3.4. Analiza morfologică .....	76	37
3.5. Clasificarea materialelor testate .....	87	41
3.6. Concluzii .....	89	42
<b>Capitolul 4 – Comportarea tribologică la zgâriere</b> .....	92	44
4.1. Modelul teoretic al contactului con-plan la zgâriere .....	92	44
4.2. Testarea la zgâriere .....	96	46
4.2.1. Parametrii de testare .....	96	47
4.2.2. Coeficientul de frecare la zgâriere .....	97	47
4.2.3. Studiul profilometric .....	100	49
4.2.4. Adâncimea medie de penetrare a urmelor de zgâriere .....	101	50
4.3. Analiza morfologică a urmelor de zgâriere .....	102	51
4.4. Concluzii după testarea prin zgâriere .....	104	52
<b>Capitolul 5 – Modelarea cu rețele neuronale pentru predicția volumului de material uzat la frecarea uscată bilă-pe-plan</b> .....	105	54
5.1. Descrierea unei rețele neuronale .....	105	54
5.2. Funcționarea unei rețele neuronale de tipul „backpropagation” .....	106	55
5.3. Utilizarea rețelelor neuronale pentru predicția volumului de material uzat .....	108	56
5.4. Validarea rețelelor neuronale și predicția volumului de uzură.....	117	60
5.5. Concluzii .....	119	61
<b>Capitolul 6 – Concluzii generale, contribuții originale și perspective</b> .....	120	62
6.1. Concluzii generale.....	120	62
6.2. Contribuții originale ale tezei .....	121	63
6.3. Direcții ulterioare de cercetare .....	122	64
<b>Listă lucrări publicate și prezentate</b> .....	124	
<b>Bibliografie</b> .....	125	65
<b>Anexe</b> .....	135	



## INTRODUCERE

Secolul XX a consacrat o nouă categorie de materiale: materialele polimerice care au o utilizare foarte mare în aproape toate domeniile vieții economico-sociale. De la aceste materiale la materialele compozite polimerice și, ulterior, la compozitele ceramice și metalice nu a fost decât un pas. Cele mai diverse domenii ale științei și tehnologiei sunt beneficiarele acestor materiale.

Prezenta lucrare a pornit de la ideea identificării unor materiale compozite pentru recondiționarea unor piese de dimensiuni mari din alamă sau bronz. Aceste materiale trebuie să fie compatibile, din punct de vedere mecanic și tribologic, cu piesele pe care le recondiționează, să permită o tehnologie simplă pentru recondiționare și să fie economice.

Din multitudinea de materiale comerciale disponibile pe piață, s-au ales trei materiale comercializate de firma Diamant Metallplastic GmbH” din München, Germania, firmă cu rezultate remarcabile obținute în domeniul întreținerii și recondiționării pieselor metalice din industrie. Acestea sunt compozite polimerice ranforsate cu particule metalice și anorganice pe bază de Cu, Zn, Sn, MoS și diferite forme alotropice ale dioxidului de siliciu ( $\text{SiO}_2$ ).

Cercetările din această lucrare s-au concentrat pe studiul tribologic al acestor compozite polimerice. Au fost efectuate teste de frecare fără lubrifiere în configurația bilă-pe-plan, în mișcare rectilinie alternativă și teste de zgâriere pentru caracterizarea mecanică a acestor materiale. În paralel, în aceleași condiții de testare, au fost investigate și materialele metalice: alama și bronzul

În primul capitol al tezei se face o prezentare generală a materialelor compozite, a tendințelor în realizarea și utilizarea acestora, a tipurilor de uzură specifice precum și a cercetărilor teoretice și experimentale efectuate pe materiale și compozite polimerice. În finalul capitolului, sunt identificate obiectivele acestei teze și direcțiile de cercetare.

În cel de-al doilea capitol se prezintă metodologia de cercetare și echipamentele utilizate în acest scop. Sunt prezentate și caracterizate materialele compozite și cele metalice, tehnologia de realizare a probelor, programele de testare și echipamentele utilizate pentru efectuarea investigațiilor.

Capitolul al treilea este dedicat în totalitate testelor tribologice. Au fost evaluate proprietățile tribologice prin coeficientul de frecare și parametri de uzură. Procesele de frecare de pe suprafața materialelor au fost analizate prin metode imagistice și profilometrice. În încheierea capitolului este făcută o clasificare a materialelor, compozite și metale, după diverse criterii: forțe de încărcare, parametri de uzură, tribomodelul utilizat, etc.

În următorul capitol al tezei, sunt prezentate rezultatele cercetărilor experimentale efectuate pentru caracterizarea materialelor la zgâriere. Este prezentat succint modelul teoretic al contactului con-plan la zgâriere, parametri de testare și rezultatele acestui test reflectate prin coeficientul de frecare la zgâriere și parametrii profilometrici.

Următorul capitol tratează modelarea proceselor de uzură prin metode neuronale. Sunt descrise rețelele neuronale și este arătată funcționarea unei rețele de tipul „*backpropagation*”. Apoi este aplicat modelul neuronal pentru predicția volumului de material uzat în procesul de frecare utilizând configurația bilă-pe-plan în mișcare rectilinie alternativă.

Ultimul capitol din teză sintetizează cele mai importante realizări, contribuțiile personale ale autorului și perspectivele de continuare a cercetărilor.

Galați,  
Septembrie 2014

Ing. Virgil Iliuță



## Capitolul 1

# STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND COMPORTAREA TRIBOLOGICĂ A MATERIALELOR COMPOZITE POLIMERICE

### 1.1. Materiale compozite – generalități

#### 1.1.1. Definirea materialelor compozite

Materialele compozite sunt definite ca materiale formate din amestecuri din două sau mai multe faze compatibile la scară microscopică, alese și orientate astfel încât materialul obținut să aibă proprietăți superioare componentelor luate separat [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Una dintre fazele constituente este discontinuă, rigidă, numită "**ranforsant**" și este dispersată în faza continuă, cu rigiditate mai scăzută numită **matrice**. Uneori, datorită interacțiunilor chimice ale altor efecte de prelucrare, apare o fază suplimentară - **interfața** - la interfața dintre ranforsant și matrice.

#### 1.1.2. Clasificarea materialelor compozite

Clasificarea materialelor compozite are în vedere mai multe criterii: natura materialului matricii, forma geometrică a ranforsantului, orientarea particulelor sau fibrelor, continuitatea acestora din urmă, numărul de straturi cu aceleași proprietăți și orientare a fibrelor, etc. O clasificare după criteriile de mai sus este arătată în fig. 1.1 [1, 8, 9].

O primă clasificare, frecvent utilizată pentru materialele compozite, este în funcție de natura materialului matricii.

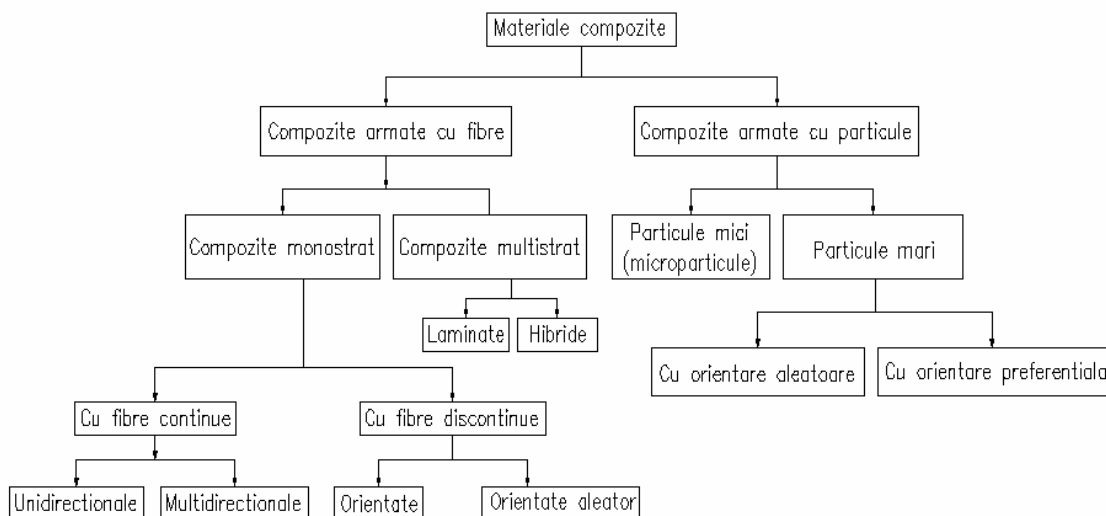


Fig. 1.1

Clasificarea materialelor compozite în funcție de forma materialului de ranforsare și orientarea lui în matrice [1, 8, 9]

După natura lor, matricile pot fi: organice, metalice, ceramice sau din carbon. Astfel, după natura matricii, materialele compozite se împart în:

a) Materiale compozite cu matrice organică (polimerică) cu două clase [1, 5, 9, 10, 11, 12]: 1. compozite cu matrice polimerică termorigidă (termoreactivă); și 2. compozite cu matrice polimerică termoplastică.

b) Materiale compozite cu matrice metalică. Materialele metalice sunt folosite ca matrici din necesitatea de-a utiliza materialul compozit la temperaturi superioare celor la care se utilizează compozitele cu matrice polimerică. În plus, materialele metalice prezintă niște caracteristici proprii: proprietăți mecanice bune, conductivitate termică și electrică foarte bune, stabilitate dimensională și prelucrabilitate ridicată, etc.

c) Materiale compozite cu matrice ceramică. Matricele ceramice sunt folosite tot mai mult datorită unor proprietăți deosebite precum: rezistență mecanică foarte bună la temperaturi ridicate, duritate mare și relativ constantă cu creșterea temperaturii, modulul de elasticitate mai mare decât cel al oțelurilor, etc.

d) Materiale compozite cu matrice din carbon. Aceste matrici sunt ranforsate doar cu fibre și țesături din grafit. Se mai folosesc uneori și fibre de bor, sticlă, carbură de siliciu sau alumina. Au proprietăți mecanice foarte bune la temperaturi de până la 3000 °C. Cel mai mare inconvenient al acestor compozite este că sunt foarte scumpe.

Altă clasificare a materialelor compozite ia în considerare forma geometrică a ranforsantului. Din acest punct de vedere sunt materiale compozite armate cu fibre și materiale compozite armate cu materiale pulverulente (particule sau pulberi) (fig. 1.1).

### 1.1.3. Materiale de ranforsare sub formă de fibre

Fibrele sunt folosite ca elemente de ranforsare, având rolul de a prelua o mare parte din solicitările la care este supus materialul care formează matricea.

Caracteristicile fibrelor care prezintă interes tehnologic sunt: rigiditatea, densitatea scăzută, duritatea mare, coeficientul de dilatare termică redus, rezistența specifică la rupere ridicată, flexibilitatea (proprietate a împletiturilor) și coeficientul de formă.

### 1.1.4. Materiale de ranforsare pulverulente

Materialul de ranforsare sub formă de **particule** are rolul de îmbunătățire a unor caracteristici electrice, mecanice, termice, etc.

Clasificarea acestor compozite are la bază natura materialului de bază (matricea) și caracterul metalic/nemetalic al materialului de ranforsare. Rezultă următoarele combinații:

1. Particule **nemetalice** dispersate într-o masă de natură tot **nemetalică**. Ambele tipuri de materiale pot fi anorganice (cazul betonului) sau matrice polimerică armată cu particule de tip elastomer (material similar cauciucului).

Particulele de armare sunt, de obicei, sferice sau apropiate de această formă; pot să fie pline sau goale la interior. Materiale utilizate: sticla, carbonul sau anumiți polimeri. Exemplu: compozit cu matrice din poliamidă ranforsată cu sfere din sticlă [13], material compozit cu matrice polimerică ranforsată cu fibre de sticlă și particule de ferită [14].

2. Particule **metalice** dispersate într-o masă de natură **nemetalică** (de obicei polimerică). Exemple tipice: compozite cu matrice de rășină epoxidică și armate cu particule bidimensionale din argint ori din cupru, sau cauciucul poliuretanic armat cu particule de aluminiu (utilizat în construcția rachetelor).

Proprietăți ale acestor compozite: conductibilitate termică bună (uneori și electrică), coeficienți de dilatare termică mici, rezistență ridicată la uzură.

3. Particule **metalice** dispersate într-o masă de natură tot **metalică**. În această categorie de compozite distingem două subgrupe:

a) *cu matrice dură* și particule de wolfram, crom sau molibden rezultând materiale compozite fragile, dar cu o mare stabilitate termică

b) *cu matrice moale* – ex.: particule de plumb în matrice din aliaje de fier sau cupru; au prelucrabilitate mecanică foarte bună în comparație cu aliajele respective în stare nearmată.

4. Particule **nemetalice** dispersate într-o matrice de natură **metalică**. Se fabrică numai la temperaturi ridicate (particulele trebuie să fie de natură ceramică: carburi, oxizi). Datorită influenței limbii franceze aceste compozite se mai numesc „*cermet*”-uri.

Particulele se folosesc, în cele mai multe cazuri, la producerea materialelor compozite cu matrice metalică. Compozitele metalice cu particule s-au diversificat foarte mult și reprezintă, în momentul de față, o categorie de materiale de care nu se poate face abstracție, fiind relativ ieftine și ușor de produs.

Pulberile folosite la realizarea materialelor compozite se produc prin diverse procedee chimice sau fizice, fiind preferate metodele care asigură grad mare de finețe și puritate ale particulelor.

#### 1.1.5. Materiale de adaos (filieri)

Un plus în îmbunătățirea proprietăților se poate obține și prin utilizarea **aditivilor** (materiale de adaos, filieri).

Aditivii sunt materiale care se introduc în matrice într-un procent de 15÷20% din greutatea totală a compozitului cu scopul îmbunătățirii unor proprietăți specifice unei anumite utilizări. Aditivii includ plastifianți, antioxidanți, agenți antistatici, agenți de cuplare, etc. Aceștia se prezintă sub forma de: pulberi, fulgi, fibre scurte sau bile de dimensiuni micro- și nanometrice și pot fi de natura *organică* (pulbere de celuloză, făină de lemn, amidon, pudră de cauciuc, negru de fum, etc.) sau *anorganică* (silicea, talcul, mica, carbonatul de calciu natural, sulfatul de bariu natural, microsferă de sticlă, fulgi și fibre metalice scurte până la 10-50 μm, etc.).

#### 1.1.6. Tendințe actuale în realizarea și utilizarea compozitelor polimerice

O caracteristică generală importantă a materialelor compozite este dată de posibilitatea proiectării caracteristicilor materialelor plecând de la forma și dimensiunile piesei finite spre deosebire de materialele metalice când se proiectează și se dimensionează piesa plecând de la caracteristicile mecanice ale materialului.

Datorită aderenței foarte bune, materialele compozite sunt utilizate tot mai mult reconstrucția pieselor metalice din oțel, alamă, bronz sau fontă de dimensiuni mari. Pe suprafața uzată se aplică un material compozit corespunzător din punct de vedere al proprietăților cu materialul piesei de reconstrucționat sub formă de pastă cu șpaclu sau cu pensula. După un interval de timp (de până la 24 h) necesar pentru întărire, suprafața de reconstrucționat se poate prelucra prin așchiere la fel ca materialul de bază.

Începând cu secolul XXI, o nouă tendință se manifestă în realizarea materialelor compozite: apariția și dezvoltarea nano-compozitelor. Acestea sunt compozite constituite din mai multe componente, la care cel puțin una are dimensiunea sub 100 nm. Prin realizarea acestor materiale se îmbunătățesc proprietățile materialelor precum rezistența la anumiți agenți chimici, stabilitatea termică și dimensională, etc. Problematika acestor materiale a fost abordată în lucrări ca [16, 17, 18, 19, 20].

## 1.2. Mecanisme de uzură specifice materialelor polimerice și compozitelor cu matrice organică

### 1.2.1. Tipuri de uzură specifice materialelor plastice și compozitelor cu matrice polimerică

Ca și în cazul metalelor și aliajelor metalice, la materialele plastice și compozitele polimerice apar cele patru tipuri de uzură acceptate de majoritatea tribologilor: abraziune, adeziune, oboseală și coroziune.

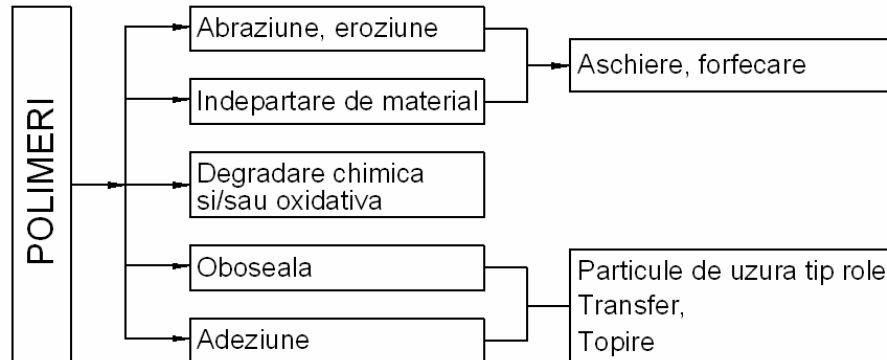


Fig. 1.3

Procese de uzură specifice materialelor plastice [21] după [22]

Astfel, Evans și Lancaster (citați de [22] în [21]) sunt printre primii care au propus o clasificare a proceselor de uzură care au loc în cuplele tribologice formate cu materiale plastice (fig. 1.3).

Procesul de uzură poate fi văzut în diferite moduri [23] și cuantificat în termeni de masă sau volum pierdut/ă din zona de contact sau de erodare. Sub acțiunea forțelor de apăsare, de frecare sau a forțelor de cavitație se produc deteriorări la cele două elemente care formează cupla tribologică. Urmează pierderea coeziunii dintre particule și, în final, desprinderea lor. Uzura chimică este un proces asemănător cu cel descris anterior, numai că reacțiile chimice dintre elementele chimice se desfășoară mai lent. În cazul materialelor polimerice, procesele de uzură sunt marcate de influența mediului, care poate include și lubrifiantii folosiți, precum și de fenomenele de încălzire locală cauzate de frecare.

În [23] Briscoe și S.K. Sinha fac o trecere în revistă a lucrărilor care tratează procesele de uzură din materialele polimerice și din compozitele lor. Astfel, ei citează lucrarea [24] în care disting următoarele procese de uzură pentru materialele polimerice: abrazivă, adezivă, transfer de căldură, uzură chimică, uzura de oboseală, fretting, eroziunea și uzura de delaminare. Aceste tipuri de uzură se întâlnesc la următoarele clase de materiale compozite: elastomeri, termorigide, polimeri pe bază de sticlă și polimeri semi-cristalini. Briscoe și S.K. Sinha concluzionează, că pentru materialele compozite polimerice, sunt trei grupe majore de factori care influențează frecarea și uzura acestora.

Astfel o primă grupă ar fi reprezentată de condițiile contactului mecanic de alunecare și de geometria suprafețelor în contact; al doilea grup de factori include proprietățile mecanice ale polimerului și modul în care acestea se schimbă datorită temperaturii și condițiilor de mediu; al treilea grup de factori implică rolul și proprietățile celui de-al treilea corp precum și filmul de transfer.

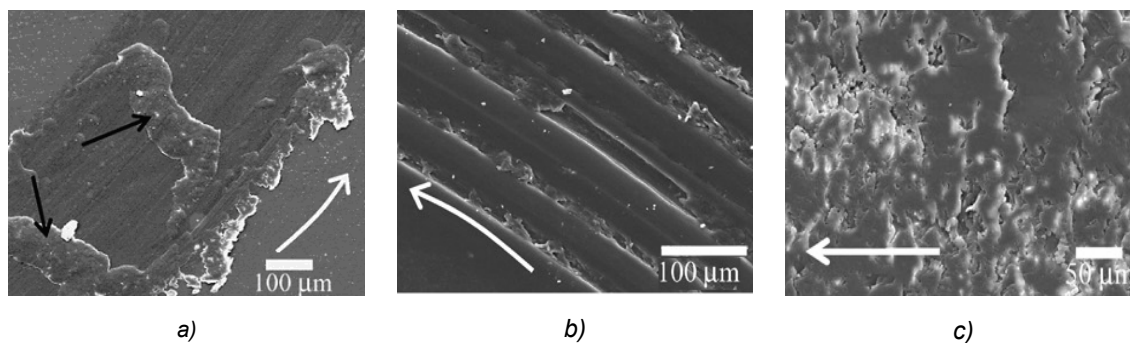


Fig. 1.5

Mecanisme de uzură tipice nanocompozitelor:

a) uzură de adeziune; b) uzură abrazivă; c) uzură de oboseală, prelucrat după [25]

Dasari A. și col. [25] prezintă într-un studiu aspecte fundamentale și cercetări în domeniul tribologiei nanocompozitelor polimerice. Sunt prezentate mecanismele de uzură specifice acestor materiale: uzura adezivă, uzura abrazivă, uzura de oboseală (fig. 1.5), uzura prin exfoliere (fig. 1.6), uzura de transfer și alte forme de uzură, ca: fretting, eroziunea, coroziune, etc.

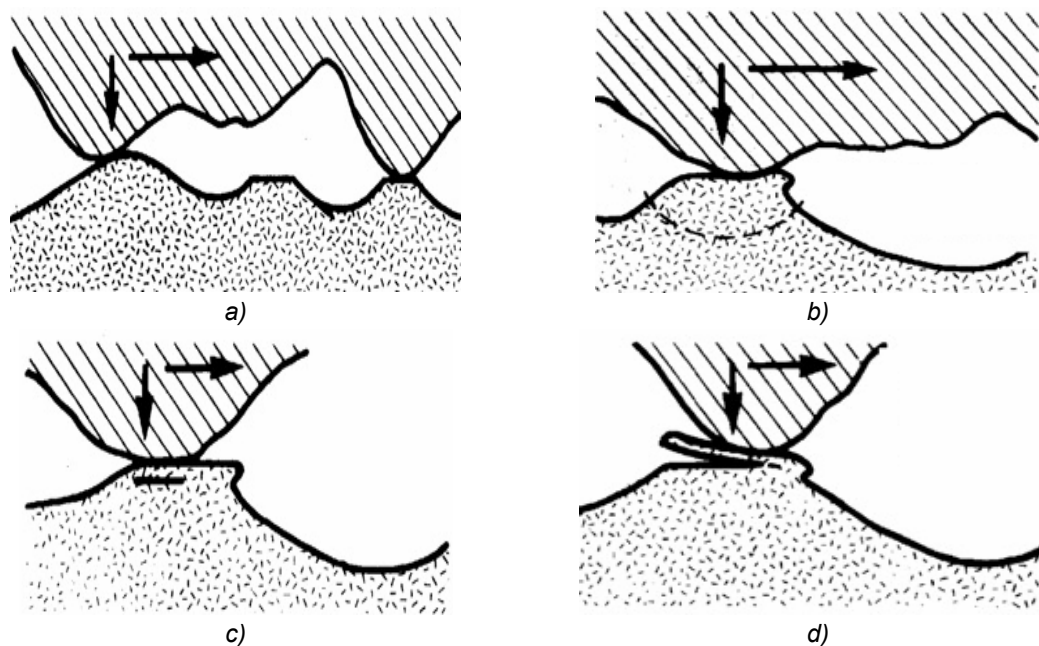


Fig. 1.6

Reprezentare schematică a procesului de delaminare: a) contact pe asperități; b) deformare plastică a asperităților; c) fisuri sub suprafață la frecare repetată; d) formarea și detașarea unei lamele de material, preluat și adaptat după [25]

### 1.2.2. Studii și cercetări privind uzura compozitelor polimerice

Caracterizarea tribologică la uzură a materialelor implică obținerea directă, prin măsurări liniare, în plan sau volum, a unor parametri de uzură și determinarea prin calcul a altor parametri, în conformitate cu [26] și acceptați de majoritatea cercetătorilor.

Parametrii de uzură obținuți indirect prin calcule sunt: viteza de uzură, prin care parametrii de uzură liniară, planimetrică, volumică sau masică sunt raportați la durata testării,

și intensitatea de uzură, prin care aceiași parametri de uzură sunt raportați la lungimea de frecare.

Un parametru, independent de durata testării și luat adesea în considerare de tot mai mulți cercetători [29, 30, 31], este coeficientul de uzură,  $k$ , [3]:

$$k = \frac{U_v}{F \cdot L_f} \quad (1.1)$$

Se mai utilizează și intensitatea de uzură ( $I_v$ ), obținută prin raportarea volumului de material uzat la lungimea de frecare [3, 28]:

$$I_v = \frac{U_v}{L_f} \quad (1.2)$$

În relațiile precedente s-au mai notat:

$F$  – forța normală de apăsare [N];

$L_f$  – lungimea de frecare [m].

Un aspect important, abordat de mulți specialiști [32, 33, 34, 35], îl reprezintă metodologia și precizia de determinare a volumului de material uzat.

Whitenton și Blau [36], citați în [34], compară trei metode de determinare a volumului de material uzat: metode gravimetrice, metode de analiză 2D și metode de analiză 3D a urmelor de uzură. Metodele gravimetrice sunt simple și rapide, dar imprecise atunci când pierderile de material sunt foarte mici ca în cazul materialelor cu rezistență mare la uzură. Metodele de analiză 3D ale urmei de uzură pentru determinarea volumului de uzură sunt mai precise, dar necesită mult timp. Din motivele arătate mai sus, cercetările specialiștilor în domeniu s-au orientat către metode de analiză 2D ale urmelor de uzură, care necesită un timp mult mai mic comparativ cu metodele de analiză 3D.

În cazul testelor de uzură în mișcare rectilinie alternativă cu bilă pe suprafață plană, standardul american ASTM G133-05 [37] preluat și în [35] prezintă trei situații posibile ale celor două triboelemente care formează cupla de frecare a tribomodelului (fig. 1.8):

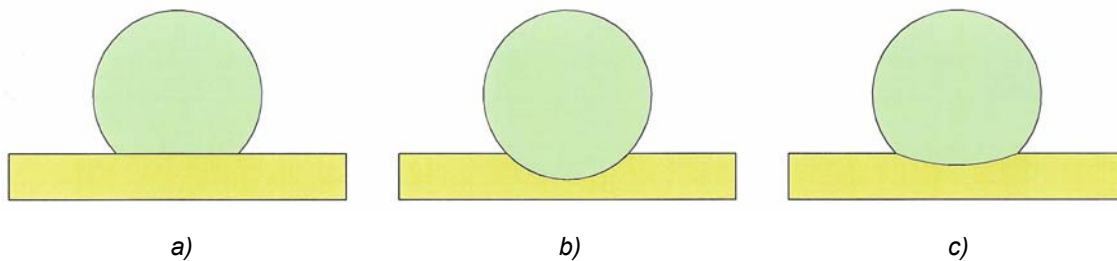


Fig. 1.8

Cazuri posibile de uzură în configurația bilă pe plan: a) uzură numai la bilă, b) uzură numai pe suprafața plană, c) uzură pe ambele elemente [35, 37]

Un prim caz de uzură este (fig. 1.8-a) când se uzează numai bila, iar uzura pe suprafața plană este nesemnificativă; în acest caz volumul de material uzat este conform [37] cu trimitere la [38]:

$$U_v = \frac{\pi h}{6} \left( \frac{3w^2}{4} + h^2 \right) \quad (1.3)$$

relație preluată și utilizată și în [34, 39]:



În relația (1.3) s-au făcut notațiile:

$d$  – diametrul urmei de uzură de pe bilă;

$R$  – raza bilei;

$h$  – înălțimea din bilă cu material pierdut prin uzură, calculat relația (fig. 1.9):

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{w^2}{4}} \quad (1.4)$$

În cazul când materialul bilei este foarte rezistent la uzură (uzura acesteia este nesemnificativă), uzura se produce pe proba cu suprafața plată și are forma prezentată în figura 1.8-b.

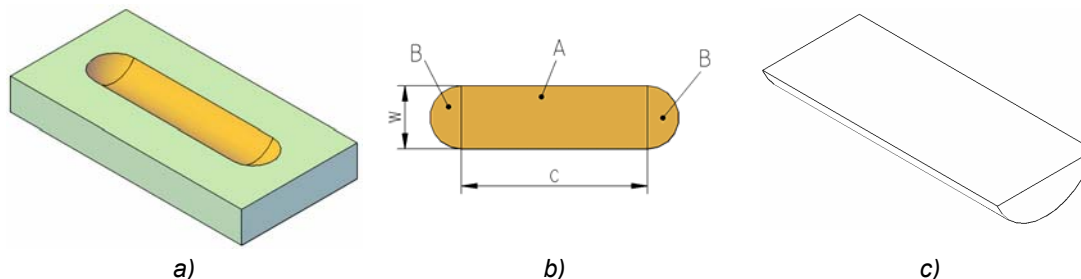


Fig. 1.10

Reprezentare schematică a urmei de uzură în configurația bilă pe plan în mișcare rectilinie alternativă, cazul când bila nu se uzează:  
a) vedere 3D; b) vedere de sus; c) vedere 3D a sectorului mijlociu al urmei de uzură

În acest caz, standardul american ASTM G133-05 [37] recomandă următoarea relație pentru calculul volumului de uzură desprins de pe proba plană: relație care ia în considerare doar zona centrală a urmei de uzură (zona A):

$$U_v = A_w \cdot c \quad (1.5)$$

în care:

$A_w$  – aria medie a secțiunii transversale a urmei de uzură, perpendiculară pe direcția mișcării;  
 $c$  – lungimea cursei mișcării rectilinii alternative.

Relația (1.5) ia în considerare doar zona centrală a urmei de uzură (A) și a fost folosită în lucrarea [30].

Alți autori [32, 33, 34, 35, 40] includ în volumul de material uzat și zonele (B) de la capetele cursei.

Al treilea caz de uzură al configurației de frecare bilă pe plan, prezentat în figura 1.8-c, este caracteristic cuplurilor de materiale care au aproximativ aceeași rezistență la uzură, ambele având o uzură pronunțată. În [34] autorii calculează volumul de uzură produs atât pe bilă cât și pe proba plată (fig. 1.11). Rezultatele obținute pentru contrapiesa sferică le extind și la alte corpuri, cu secțiune axială compusă din arce de cerc și linii (ex.: forme eliptice). Metoda este denumită „metoda de analiza a volumului de uzură pe o singură urmă”

Cazul când ambele materiale se uzează este studiat și de Sharma S. și col. în [35]. Autorii consideră că uzura bilei se face după o calotă sferică, iar urma de uzură de pe proba plană are fundul aplatizat. În această lucrare autorii consideră volumul de material uzat format din volumul zonei centrale (cilindrice) și cel de la capetele de cursă.

În ultimul timp, profilometre performante permit determinarea directă a volumului de material uzat prin scanarea urmei de uzură chiar pentru dimensiuni apreciabile (de câțiva metri) ale acestora [41]

### 1.2.3. Cercetări privind testarea materialelor în mișcare alternativă rectilinie în configurația bilă-pe-plan

O sinteză a cercetărilor din domeniu compozitelor, mai ales a compozitelor polimerice, în care au fost efectuate testări în configurația bilă-pe-plan este prezentată în lucrarea [42].

Materialele supuse investigațiilor tribologice în mișcare rectilinie alternativă sunt din cele mai diverse: de la materiale polimerice și până la materiale compozite ceramice, de la materiale și aliaje metalice până la filme și acoperiri obținute prin depunere fizică (PVD) sau chimică (CVD) de vapori pe suporturi metalici sau din materiale compozite. Au fost efectuate teste în configurația bilă-pe-plan pe materiale moi precum politetrafluoretilenă (PTFE) [22], poliamidă PA6 [43, 44], polietilenă înalt densificată (UHMWPE) [45], polifluorură de viniliden (PVDF) [46, 47], toate ranforsate cu fibre de carbon în diverse proporții, polietersulfonă (PES) [48] ș.a., dar și pe materiale mai dure precum: compozite ceramice [29, 31, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57], composite metalice [58], metale și aliaje metalice [39, 52, 59, 61], filme sau acoperiri metalice [29, 49, 53, 59, 62, 63, 64, 65].

Având în vedere utilizarea unor materiale compozite în realizarea unor proteze umane, unele cercetări s-au axat pe studiul comportării tribologice a unor țesuturi umane [61, 66] sau de bovine [67, 68].

În majoritatea cazurilor, contrapiesa, cu care au făcut cuple probele din materialele prezentate mai sus, a fost din oțel [31, 43, 44, 47, 48, 51, 54, 56, 57, 59, 60, 62, 64, 69, 70] cu diametrul de 2÷10 mm, cu rugozitatea  $R_a=0,1 \mu\text{m}$  și duritatea HRC 62-64. În unele cercetări [45, 49, 50, 52, 55, 65], bila a fost executată din materiale ceramice, având diametrul de 4÷5 mm. În lucrarea [29] s-a folosit o bilă de safir cu diametrul de 1,6 mm. De asemenea, s-au mai utilizat contrapiese știfturi cu vârful plat din cartilaj uman [61] sau din cartilaj de bovine [66].

Referitor la echipamentele de testare tribologică, se constată o largă utilizare a tribometrelor universale UMT-2, CETR (actual Bruker, Germania), [29, 31, 39, 43, 44, 47, 51, 52, 56, 57, 58, 59, 61, 62, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74] pentru sarcini normale de până la 200 N. Liu et al. [66] folosește un tribometru destinat probelor biomedicale tot din categoria UMT. Alți cercetători [49, 50, 54, 55, 63] au efectuat teste tribologice pe alte tipuri de tribometre: PLINT TE67/R, PLINT TE77 (Phoenix Tribology Ltd., Newbury, UK) sau microtribometrul MUST (Falex Tribology N.V., Belgium) [49].

Testele de uzură bilă-pe-plan, cu mișcare rectilinie alternativă, au fost efectuate în următoarele condiții și cu următorii parametri de testare:

- forța de încărcare: de la 0,5 N [51, 66] la 60 N [39, 71, 72, 73] sau chiar 600 N [48];
- frecvența a fost cuprinsă, în cele mai multe cazuri, în intervalul 1÷15 Hz, uneori chiar și mai mari ca în [75] când a fost și de 50 Hz.;
- cursa: 4÷8,46 mm și chiar până la 17,5 mm în [66];
- durata testelor a fost mai mică de 2 ore, iar în unele cazuri a ajuns până la 8 ore;
- viteza de alunecare medie: <17 mm/s;
- numărul de cicluri: <21000;
- temperatura: toate testele s-au desfășurat la temperatura camerei;
- umiditatea relativă: 25÷60%.

În majoritatea lucrărilor, principalele obiective au vizat, printre altele, comportarea tribologică a materialelor studiate; au fost întocmite grafice de variație a coeficientului de frecare, a volumului de uzură sau a ratei de uzură specifică în funcție de diverse variabile: lungimea de frecare, timpul, frecvență, numărul de cicluri, etc. De asemenea, aproape toți cercetătorii au folosit microscopia electronică de baleiaj (SEM), microscopia cu transmisie

(TEM) pentru studierea suprafețelor urmelor uzate sau spectroscopia cu raze X (EDX, XRD) pentru identificarea constituenților structurali. În unele lucrări au fost folosite metode profilometrice pentru analiza urmelor de uzură și identificarea parametrilor de uzură volumică [71, 76, 77].

În literatura de specialitate sunt foarte puține lucrări care au studiat materialele compozite ranforsate cu micro- sau nano-particule din materiale metalice. Una din aceste lucrări este [78] în care Olea-Mejia O. și col. au studiat rezistența la uzură și mecanismele de uzare pentru polietilenă de joasă densitate (LDPE) ranforsată cu micro particule de Al, Ag (ambele sferice, cu mărimea 1,0 și, respectiv, 6,4  $\mu\text{m}$ ) și Ni (fulgi cu mărimea de 4,2  $\mu\text{m}$ ), și nanoparticule de Al și Ag (cu mărimea de 127 și, respectiv, 69 nm). Testarea s-a efectuat în configurația bilă pe disc aflat în mișcare de rotație. În funcție de mărimea particulelor, autorii au observat câteva mecanisme de uzură precum: deformări, delaminări, abraziune, adeziune și formațiuni roluite. Au mai constatat că particulele de Al reduc semnificativ uzură polimerului, cele de Ag măresc rata de uzură, iar nanoparticulele au un efect mai bun decât microparticulele.

#### 1.2.4. Cercetări privind caracterizarea materialelor prin zgâriere

Zgărirea poate fi definită ca un proces mecanic unde o forță sau deplasare controlată este exercitată de un indenter pe suprafața unui material cu o viteză prescrisă. În termeni de uzură, K. Friedrich [80] consideră zgărirea ca o subdisciplină a tribologiei în care o singură asperitate, cu înalte caracteristici de abraziune, execută o singură urmă.

Testele de zgâriere sunt utilizate pe scară largă pentru caracterizarea unui material pentru că sunt rapide și ușor de realizat [80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90]. Recomandări privind procedurile de efectuarea testelor de zgâriere se găsesc în standardul american G 171 – 03, *Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus* [91], standardul internațional ISO 19252 [92] și norma europeană EN 1071 [93].

Testele de zgâriere cu sarcină progresivă și constantă au fost folosite în lucrările [81, 82] pentru caracterizarea straturilor de pulbere de poliester (60÷80  $\mu\text{m}$ ) depuse prin pulverizare în câmp electrostatic și uscate la temperaturi de 100÷200 °C timp de 5, 10 și 20 minute. Au fost efectuate teste variind parametri ca: viteza de zgâriere, temperatura și durata de coacere a stratului de poliester după depunere.

Barleta M. și col. [83] studiază acoperirile mono și multistrat prin teste de zgâriere. Straturile de acoperiri aplicate sunt din pulberi de metal Al-Mg (4,5%) și un hibrid organic-anorganic de rășini (fenil-metil silicon). Întărirea s-a făcut la temperatura de 250 °C timp de 45 minute. Autorii au ajuns la concluzia că rezistența la zgâriere depinde de numărul de straturi alternative aplicate și de tratamentul prealabil aplicat suportului înainte de acoperire.

R.L. Browning și col. [85] propun o metodologie de evaluare cantitativă a rezistenței la zgâriere a unor acoperiri polimerice acrilice pe suport din oțel. Testele, efectuate cu forță progresivă, se furnizează informații despre sarcinile critice de deteriorare la exfoliere, fisurare transversală, flambaj. Coordonatele desfășurării testului au fost: lungimea de zgâriere de 150 mm, sarcina liniar-crescătoare, de la 1 N la 100 N, și viteza de zgâriere de 100 mm/min. Indentorul folosit a fost o bilă din oțel inox cu diametrul de 1 mm. Au fost efectuate șase teste pentru fiecare probă. Metodologia de evaluare cantitativă a testului, după autorii lucrării, presupune cunoașterea forțelor de penetrare de la începutul și sfârșitul zgârierii,  $F_0$  și, respectiv  $F_f$ , lungimea de testare,  $L_s$ , și distanța măsurată între punctul de apariție al defectului și sfârșitul zgârierii,  $x$ . Cu aceste mărimi se determină forța critică,  $F_z$  cu relația:

$$F_z = \frac{L_s - x}{L_s} \cdot (F_f - F_0) + F_0 \quad (1.15)$$

Referitor la rezultatele testelor de zgâriere, se subliniază că valorile pentru sarcina critică la exfoliere, fisurări transversale și flambaj precum și lățimea zonei deteriorate cresc odată cu creșterea grosimii stratului de acoperire până la o valoare critică, după care valorile se stabilizează.

K. Friedrich și col. [80] abordează rezistența la zgâriere pentru câteva materiale polimerice de înaltă performanță: polibenzimidazol (PBI), poliparafenilenă (PPP), polieteretercetona (PEEK) și poliimidă (PI10). Rezistența la zgâriere a acestor materiale a scăzut în ordinea enumerării de mai sus. Urmele de zgâriere au fost studiate cu ajutorul unui microscop laser confocal și cu microscopul electronic de baleiaj (SEM). Au fost făcute corelații între caracteristicile mecanice ale materialelor (modulul Young), adâncimea și duritatea la zgâriere. Aceasta din urmă a fost calculată cu relația:

$$H_s = \frac{F_N}{A_s} = 4 \frac{F_N}{\pi \cdot w^2} \quad (1.16)$$

unde:  $F_N$  este forța normală de penetrare,  $A_s$  este aria de contact la alunecare, și  $w$  este lățimea urmei de zgâriere măsurată la sfârșit curse.

P. Kurkcu și col. [87] au studiat comportamentul la zgâriere pentru o serie de materiale comerciale corelat cu caracteristicile mecanice globale intrinseci ale acestora. Pentru calculul durității la zgâriere a fost utilizată relația de calcul (1.16). Autorii arată că această relație este recomandată în cazul metalelor, iar pentru materialele polimerice prezintă o relație propusă de Briscoe în [94] citat în [87]:

$$H_s = q \frac{F_n}{\pi \cdot a_c^2} \quad (1.17)$$

unde:  $F_n$  este forța normală de penetrare,  $a_c$  este raza de contact la alunecare, și  $q$  este factor de material, cu valori între 1 și 2.

Într-o altă lucrare [98], S.K. Sinha și col. studiază efectul aditivării cu nano-argilă (0, 2,5, 5, 7,5 și 10%) asupra caracteristicilor la zgâriere ale compozitelor polimerice cu matrice din poliamidă PA6. Testele de zgâriere au fost efectuate cu un indentor din oțel de scule conic (unghi la vârf de 30° și raza de racordare de 3,03 μm), cu forță constantă asigurată de masele de 100, 150, 250, 500, 900, 950 și 1000 g. Viteza de zgâriere a fost de 0,2 mm/s. După testare, suprafața urmelor a fost investigată cu un profilometru laser și cu microscopul cu scanare electronică (SEM). Duritatea la zgâriere a fost calculată cu relația (1.17) în care  $q=1,5$ . Autorii concluzionează că: duritatea la zgâriere scade odată cu creșterea concentrației de nano-argilă; 2. lățimea urmei crește și adâncimea scade cu creșterea concentrației de nano-argilă.

N.L. Surampadi și col. [99] arată că deformarea la zgâriere a compozitului polimeric cu matrice de nylon 66 ranforsat cu fibra de sticlă (33%) este puternic dependentă de sarcina normală aplicată. Sarcina aplicată a luat valori de la 2 la 6 kgf. Suprafețele de uzură au fost studiate cu ajutorul microscopiei de forță atomică (AFM) și microscopiei cu scanare electronică (SEM). Alte idei desprinse din lucrare subliniază faptul că la sarcini mici, interfața matrice-ranforsant rămâne intactă, pe când la sarcini mari aceasta se deteriorează favorizând ruperea fragilă și dezlipirea de pe fibrele de sticlă.

### 1.2.5. Cercetări privind utilizarea rețelelor neuronale în modelarea proceselor tribologice ale compozitelor polimerice

Rețelele neuronale, adoptate după modelul neurologic al neuronilor, au apărut încă de la jumătatea secolului trecut, dar au căpătat o largă răspândire mult mai târziu odată cu dezvoltarea tehnicii de calcul care a permis implementarea acestora în multe domenii științifice. Primele lucrări în care se pun bazele modelelor teoretice pentru utilizarea rețelelor neuronale apar în ultimul deceniu al secolului XX [101, 102] citați în [103].

În domeniul tribologiei, primele lucrări care utilizează rețelele neuronale au apărut încă de la începutul acestui secol [104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112]. Astfel, Zhang și Friedrich fac o trecere în revistă unor aplicații a rețelelor neuronale la polimeri, compozitele polimerice, metale și la alte materiale. Hany El Kadi în [110] face o introducere în rețelele neuronale (descriere, clasificare) urmată de o trecere în revistă a lucrărilor care utilizează rețelele neuronale în cazul compozitelor polimerice ranforsate cu fibre.

Z. Jiang și col. [113] au studiat, din punct de vedere tribologic, un compozit hibrid cu matrice de PPS (polyphenylene sulphide) ranforsat cu fibre scurte de carbon (15%) și particule de  $\text{TiO}_2$  (7%) utilizând modele de studiu bazate pe rețele neuronale. Instruirea rețelei neuronale pentru studiul tribologic s-a făcut cu un set de 101 date experimentale. Cu ajutorul rețelelor neuronale s-a găsit compoziția optimă pentru compozit ca fiind cu 15% fibre scurte de carbon și 6% particule de  $\text{TiO}_2$ . Tot cu rețelele neuronale au întocmit diagrame 3D pentru coeficientul de frecare și rata specifică de uzură ca funcții de viteza de alunecare și presiunea aplicată (fig. 1.16).

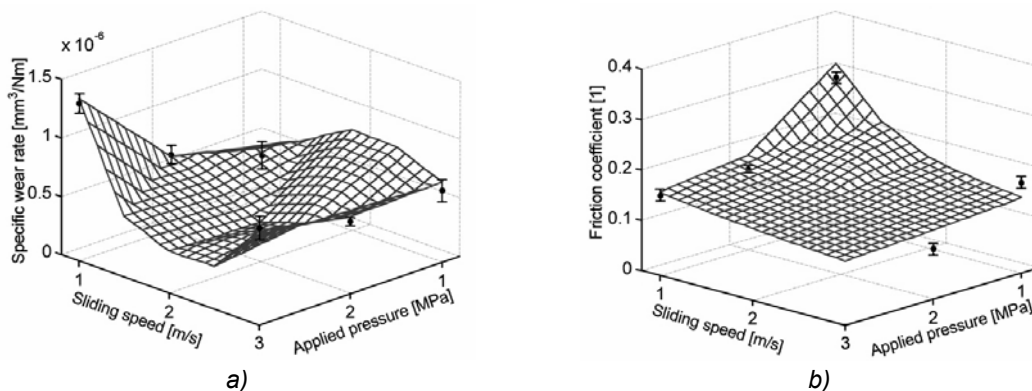


Fig. 1.16

Diagrame 3D obținute cu rețele neuronale:

a) pentru rata specifică de uzură; b) pentru coeficientul de frecare [113]

Albidewi [114] clasifică, cu ajutorul rețelelor neuronale, particulele de uzură microscopice după aspectul lor vizual și morfologic. În funcție de această clasificare a fost utilizată o rețea cu un singur strat ascuns. Clasificarea este considerată utilă pentru anticiparea deteriorării, prin uzură, a motoarelor și a altor mașini.

Aleksendric și Duboka [111] folosesc tehnica rețelelor neuronale pentru a anticipa performanțele materialelor compozite utilizate la frecare. Rezultatele au fost apreciate prin intermediul unei mărimi de ieșire (coeficientul de frecare) obținută în baza unor mărimi de intrare grupate astfel: caracteristicile materialului (18 parametri), condiții de fabricare (5 parametri) și condiții de testare (3 parametri). Au fost produse și testate cinci tipuri de materiale compozite. Rezultatele predicției au fost comparate cu rezultatele reale obținute în urma testelor. Au fost utilizate 15 arhitecturi neuronale și cinci algoritmi de antrenare a rețelelor. Utilizarea tehnicilor bazate pe rețele neuronale a permis modelarea unui sistem

neliniar cu 26 parametri de intrare și cu o ieșire. De asemenea, autorii au subliniat că următorii factori influențează capacitatea de predicție a rețele neuronale: a) baza de date; b) gama și distribuția datelor de intrare; c) datele de preprocesare; d) structura rețelei neuronale; e) algoritmul de formare; f) formarea rețelei neuronale; g) testarea rețelei neuronale.

Kemal Ciliz și Tomizuka [108] folosesc o rețea neuronală de tipul MPL (Multilayer Perceptron) pentru modelarea fenomenelor de frecare din cuplele tribologice ale unui servomecanism. Modelul de rețea utilizat conține un strat de intrare, un strat de ieșire și un strat ascuns cu nouă noduri. Rezultatele, comparate și cu un model parametric adaptiv propus de literatura de specialitate, au fost validate de rezultatele unor teste experimentale. Modelul neuronal s-a dovedit a fi mai precis decât modelul parametric în cazul servomecanismului.

În lucrările [104,105], autorii subliniază potențialul rețelelor neuronale în modelarea unor fenomene tribologice complexe, neliniare precum și în procesul de producție. Din studierea lucrărilor din domeniul rețelelor neuronale, reiese că acestea au fost utilizate în două direcții: predicție pentru un sistem mecanic, și clasificări, utile în scopul recunoașterii condițiilor de funcționare și de recunoașterii defectelor. De asemenea, cele mai utilizate tipuri de rețele neuronale sunt: MLP pentru predicție și clasificări, Kohonen și ART (Adaptive Resonance Theory) pentru clasificări.

În lucrarea [115] se face o trecere în revistă a utilizării rețelelor neuronale și a metodei Taguchi în cercetarea materialelor compozite cu matrice polimerică. Autorii subliniază utilitatea acestor instrumente și eficiența lor în estimarea proprietăților materialelor compozite polimerice, în condițiile în care utilizarea altor metode este dificilă sau costisitoare.

De asemenea, cercetătorii Zhang și Friedrich [109] fac un review al lucrărilor care utilizează rețelele neuronale în predicția duratei de viață la uzura de oboseală, a caracteristicilor de performanță la uzură a materialelor compozite polimerice. Se subliniază că modelele neuronale sunt cele mai potrivite pentru prezicerea comportamentului mecanic și tribologic al compozitelor polimerice. Același lucru îl face El Kadi H. în [110] și cu aceleași concluzii.

Zhang Z. și col. [117] aplică tehnica rețelelor neuronale pe trei materiale compozite polimerice: polietilenă (PE), poliuretan (PUR) și un poliuretan tratat higrotermic (HD-PUR) testate la eroziune. Datele de intrare au fost proprietăți ale materialelor (conținutul de rășini epoxidice) precum și unghiul de impact al particulelor de eroziune. Ieșirea a fost rata de uzură la eroziune. Concluziile desprinse din lucrare sunt: 1. s-a obținut o clasificare a importanței proprietăților materialelor în uzura de eroziune; 2. modelarea cu rețelele neuronale este un instrument matematic util în analiză și predicție în studiul compozitelor polimerice, pe baza unui număr limitat de rezultate experimentale.

Nasir T. și col. [112] aplică tehnica rețelelor neuronale pentru predicția coeficientului de frecare cu bune rezultate la materiale compozite polimerice multistrat, ranforsate cu fibre de sticlă, având trei orientări ale acestora. Matricea compozitelor este un poliester nesaturat. Testele de frecare s-au efectuat în configurația prismă-pe-rolă, în condiții fără lubrifiere, la diferite forțe de apăsare (30, 50, 70, 100N), turațiile fiind de 300, 500, 700 rot/min și durata de testare fiind 0-600s. S-au cules peste 7000 de date experimentale care au fost introduse ca intrări în rețeaua neuronală. Ieșirea din rețea a fost coeficientul de frecare. Au fost testate mai multe modele de rețele neuronale, iar concluzia a fost că cel mai bun model pentru predicția coeficientului de frecare este cel cu un singur strat ascuns.

## 1.6. Obiectivele tezei

În această lucrare, autorul și-a propus următoarele obiective:

1. Evaluarea comportării la uzură a unor materiale compozite folosite pe larg în lucrările de recondiționare a pieselor metalice din alamă și bronz, prin teste tribologice, în configurația bilă pe plan cu mișcare rectilinie alternativă, cu frecare uscată;
2. Explicarea și interpretarea mecanismelor de uzură;
3. Studiarea influenței forței de încărcare asupra comportării tribologice a materialelor studiate (compozite și materiale metalice);
4. Compararea rezultatelor obținute pentru materialele compozite cu cele similare obținute pentru materiale metalice supuse recondiționării, alamă și bronz;
5. Identificarea proceselor de uzură care au loc în stratul superficial al suprafețelor uzate prin diverse metode specifice de investigare: microscopie, difractometrie, profilometrie, etc.;
6. Analiza suprafețelor uzate – microtopografia - cu ajutorul profilometriei 3D;
7. Clasificarea materialelor după comportamentul la diverse încercări;
8. Compararea rezultatelor tribologice obținute pentru materialele studiate după configurația de testare folosită.
9. Modelarea unor procese tribologice prin metode neuronale;

## 1.7. Strategia cercetării

În această lucrare, autorul și-a propus următoarele etape pentru atingerea obiectivelor propuse:

1. Identificarea și procurarea unor materiale compozite utilizabile pentru recondiționarea unor piese metalice din alamă și bronz;
2. Realizarea unei tehnologii proprii pentru realizarea probelor de testare și, respectiv, pentru recondiționarea pieselor metalice;
3. Alcătuirea unei baze de date prin studierea literaturii de specialitate din domeniul tribologic specific materialelor compozite și, în special, al compozitelor polimerice cât și al metodelor de testare tribologică în configurația bilă pe plan în mișcare rectilinie alternativă;
4. Alcătuirea unei baze de date documentare referitoare la testarea materialelor prin zgâriere;
5. Întocmirea unei sinteze a cercetărilor tribologice efectuate cu rețele neuronale ;
6. Stabilirea unui program de testare și de analiză a probelor testate;
7. Efectuarea unor studii comparative din punct de vedere al comportării tribologice a materialelor după diverse criterii;
8. Interpretarea și discutarea rezultatelor obținute;
9. Identificarea proceselor de uzură care au loc în stratul superficial al materialelor studiate prin microscopie optică și electronică;
10. Studiarea microtopografiei suprafețelor uzate prin profilometrie 2D și 3D, și identificarea proceselor de uzură și corelarea acestora cu parametrii de testare;
11. Clasificarea materialelor studiate din punct de vedere al parametrilor tribologici pentru configurațiile de testare utilizate;

## Capitolul 2

### METODOLOGIA DE CERCETARE ȘI ECHIPAMENTELE UTILIZATE

#### 2.1. Materialele supuse investigațiilor

Materialele probelor care au fost supuse investigațiilor tribologice sunt materiale compozite cu matrice organică cu diverse particule de ranforsare, compatibile din punct de vedere al utilizării cu unele materiale metalice ca: alama de înaltă rezistență marca SAE 430B (SR CR 12776:2002) și bronzul cu Al marca CuAl9Fe3T, STAS 198/2-92.

Materialele supuse investigațiilor sunt produse de firma „Diamant Metallplastic GmbH” din München, Germania, firmă cu rezultate remarcabile obținute în domeniul întreținerii și recondiționării pieselor metalice din industrie. Aceste produse sunt din categoriile [129]:

- *Multimetall Messing*, material denumit în continuare Compozit pentru alamă (cod SAC). Acesta este un compozit utilizat pentru recondiționarea pieselor din alamă;
- *Multimetall Bronze*, material denumit în continuare Compozit pentru bronz (cod SBC); este recomandat de firma producătoare pentru recondiționarea pieselor din bronz;
- *Moglice* un material compozit utilizat pentru recondiționarea atât a pieselor din oțel cât și a celor din alamă sau bronz (cod SMC) [130].

Materialele compozite menționate mai sus se prezintă sub forma a două componente, livrate de separat, notate A și B. Componenta A este o rășină epoxidică în care sunt înglobate particule metalice sau particule de compuși chimici anorganici, iar componenta B este un întăritor chimic. Prin amestecarea celor două componente, în limitele unor proporții recomandate de firma producătoare, se poate obține, în funcție de tehnologia de aplicare pe materialul metalic clasic, fie un fluid, fie o pastă. După aplicare pe suprafața metalică, se așteaptă un timp (4...30 ore) pentru întărirea compozitului, interval după care piesele pot fi supuse unor solicitări maxime. Materialele compozite pot fi depuse pe suprafețele de recondiționat cu pensula sau cu șpaclu. În majoritatea cazurilor, aceste compozite pot fi prelucrate mecanic prin așchiere în același mod și aceleași condiții ca materialul de bază al piesei supuse recondiționării. În alte cazuri, calitatea și precizia suprafețelor obținute sunt suficient de bune încât să nu mai fie necesară prelucrarea ulterioară a acestora prin așchiere.

Caracteristicile fizico-mecanice ale acestor materiale, publicate de producător, sunt prezentate în continuare. Acestea se remarcă prin proprietăți fizice și mecanice deosebite.

##### a) materialul compozit SAC [129]:

- material compozit cu matrice epoxidică ranforsată cu particule din cupru, zinc și SiO<sub>2</sub>, folosit pentru repararea, întreținerea și recondiționarea pieselor din alamă;
- conferă excelente proprietăți (aspect identic cu metalul de bază, prelucrabilitate prin așchiere, aderență, contracție mică, rezistență la uzură abrazivă și eroziune, rezistență la șoc mecanic, stabilitate termică de la -32°C la +160°C);
- principalele caracteristici fizico-mecanice: duritate Shore 84÷86 (conform DIN 53505); modul de elasticitate 5800 N/mm<sup>2</sup>; rezistență la tracțiune 63 N/mm<sup>2</sup>; rezistență la strivire 5,4 N/mm<sup>2</sup>; rezistență la forfecare 17 N/mm<sup>2</sup>; rezistență la încovoiere 80 N/mm<sup>2</sup>; rezistență la compresiune 155 N/mm<sup>2</sup>;
- se utilizează pentru: repararea defectelor de turnare (porozitate, crăpături, fisuri), refacerea suprafețelor uzate, a erorilor de prelucrare mecanică, etanșarea de



macroporozități, corectarea cordoanelor de sudură, pentru completarea și astuparea găurilor în diferite piese, etc.

b) materialul compozit SBC [129]:

- material compozit cu matrice epoxidică ranforsată cu particule din cupru, staniu și  $\text{SiO}_2$ , folosit pentru repararea, întreținerea și recondiționarea pieselor din bronz;
- conferă excelente proprietăți (aspect identic cu metalul de bază, prelucrabilitate prin așchiere, aderență, contracție mică, rezistență la uzură abrazivă și eroziune, stabilitate termică de durată: de la  $-32^\circ\text{C}$  la  $+160^\circ\text{C}$ , până la  $350^\circ\text{C}$  pentru perioade scurte);
- principalele caracteristici fizico-mecanice: duritate Shore 86, (conform DIN 53505); modul de elasticitate  $5800 \text{ N/mm}^2$ ; rezistență la tracțiune  $62 \text{ N/mm}^2$ ; rezistență la strivire  $5,4 \text{ N/mm}^2$ ; rezistență la forfecare  $16,5 \text{ N/mm}^2$ ; rezistență la încovoiere  $79,5 \text{ N/mm}^2$ ; rezistență la compresiune  $155 \text{ N/mm}^2$ ;
- se utilizează pentru: repararea defectelor de turnare (porozitate, crăpături, fisuri), refacerea suprafețelor uzate, a greșelilor de prelucrare mecanică, etanșarea de macroporozități, corectarea cordoanelor de sudură, pentru completarea și astuparea găurilor în diferite piese, etc.

c) materialul compozit SMC[129, 130]:

- material compozit cu matrice organică formată din rășini epoxidice și ranforsat cu  $\text{MoS}_2$  și  $\text{SiO}_2$ , folosit pentru repararea, întreținerea și recondiționarea pieselor din diverse materiale;
- conferă excelente proprietăți de antifricțiune, aderență, amortizare la vibrații, prelucrabilitate prin așchiere cu posibilitatea realizării pieselor la cote finale în toleranțe foarte strânse și suprafețe cu rugozitate foarte mică; stabilitate dimensională, contracție mică, stabilitate termică de durată de la  $-20^\circ\text{C}$  la  $60^\circ\text{C}$ , de la  $-40^\circ\text{C}$  până la  $125^\circ\text{C}$  pentru perioade scurte;
- principalele caracteristici fizico-mecanice: duritate Shore 88, (conform DIN 53505); modul de elasticitate  $10400 \text{ N/mm}^2$ ; rezistență la tracțiune  $42 \text{ N/mm}^2$ ; rezistență la presiune statică a suprafețelor  $12,5 \text{ N/mm}^2$ ; rezistență la încovoiere  $66 \text{ N/mm}^2$ ; rezistență la compresiune  $120 \text{ N/mm}^2$ ;
- se utilizează pentru: realizarea suprafețelor de alunecare și reparații la ghidaje de mașini-unelte, lagăre de alunecare, organe de conducere a mișcării, etc.

Caracteristicile fizico-mecanice și tribologice ale materialelor compozite sunt comparate cu caracteristicile similare ale materialelor metalice pe care le recondiționează/substituie. Aceste materiale sunt: alamă de înaltă rezistență, marca SAE 430B (SR CR 12776) și bronz cu aluminiu marca CuAl9Fe3T (STAS 198/2- 1992)

### 2.1.1. Caracterizarea materialelor compozite

Inițial, cercetările în scopul caracterizării materialelor compozite, au fost efectuate în cadrul unui proiect de cercetare [131] realizat de SC Uzinsider Engineering Galați în parteneriat cu Departamentul de Inginerie mecanică al Universității "Dunărea de Jos" din Galați.

În urma cercetărilor efectuate în cadrul acestui proiect, a rezultat că materialele compozite au un ansamblu de caracteristici fizico-mecanice care le fac atractive pentru aplicațiile ingineresti. Se remarcă, în primul rând, densitatea foarte mică comparativ cu cea a materialelor metalice care sunt recondiționate.

Analiza morfologică a materialelor compozite a fost studiată prin microscopie optică, cu microscopul optic Olympus Bx60m din dotarea SC Uzinsider engineering SA Galați. Imaginile captate arată (fig. 2.2) că toate materialele compozite analizate au o structură eterogenă, formată dintr-o matrice organică, în care sunt dispersate foarte fin particule de ranforsant.

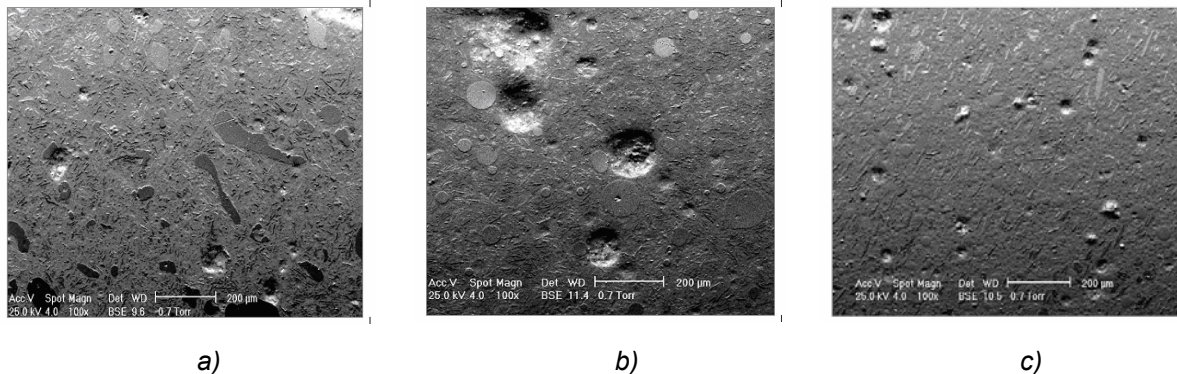


Fig. 2.1.

Imagini SEM tipice ale materialelor compozite obținute la microscopul electronic Philips XL 30 ESEM [131]: a) compozit SAC; b) compozit SBC; c) compozit SMC

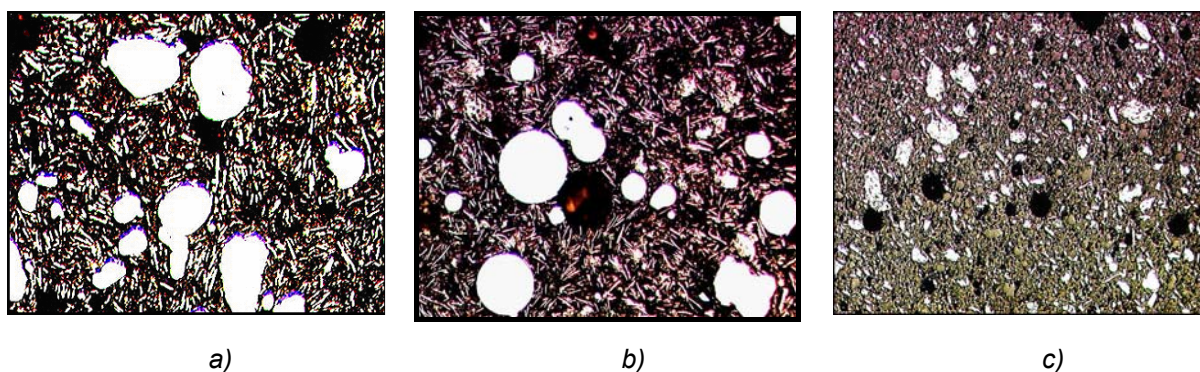


Fig. 2.2

Microstructura materialelor compozite efectuată cu microscopul optic OLYMPUS Bx60m, mărire 100x: a) compozit SAC; b) compozit SBC; c) compozit SMC

Investigațiile difractometrice cu raze X efectuate au evidențiat componenții structurali ai compozitelor polimerice studiate (tab. 2.1), iar prin analiza spectrometrică EDX a materialelor compozite au fost identificate elementele chimice ale particulelor ranforsantului. Se constată următoarele [131].

- compozitul SAC are în componență faza  $\alpha\text{CuZn}$ , constituent structural foarte plastic specific alamelor, staniu, metal cu plasticitate foarte ridicată, și  $\text{SiO}_2$  aflat sub diferite stări alotropice;

- compozitul SBC are în matrice compusul intermetalic  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , specific bronzurilor, faza plastică  $\alpha\text{CuZn}$  și constituentul  $\text{SiO}_2$  aflat sub diferite stări alotropice;

- compozitul SMC are structura cea mai dură fiind formată din matricea organică ce conține o altă formă alotropică a oxidului de siliciu (cristobalitul, un component dur) și, ca ranforsant, conține bisulfura de molibden, constituent cu remarcabile proprietăți de rezistență la uzură abrazivă și lubrifiere.

Tabelul 2.1  
Constituenții materialelor compozite identificați cu difractometrul  
Dron 3.0 [131]

Cod probă	Faze identificate	Sistem cristalografic
SAC	cuarț $\beta$ $\text{SiO}_2$	H
	Keatit $\text{SiO}_2$	T
	Cristobalit $\alpha$ $\text{SiO}_2$	T
	Sn	T
	$\alpha$ CuZn	CFC
SBC	cuarț $\beta$ $\text{SiO}_2$	H
	Keatit $\text{SiO}_2$	T
	Cristobalit $\alpha$ $\text{SiO}_2$	T
	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$	H
	$\alpha$ CuZn	CFC
SMC	Cristobalit $\alpha$ $\text{SiO}_2$	T
	$\text{MoS}_2$	H

Notații folosite în tabelul 2.1:

T – tetragonal;

H – hexagonal;

CFC – cub cu fețe centrate.

Investigațiile spectrometrice EDX, efectuate asupra particulelor de ranforsant, au evidențiat prezența unor elemente comune compozitelor SAC și SBC precum: Cu, Si, Zn, O, Sn, S. La compozitul SMC au fost detectate elementele: Si, S, O și Mo.

### 2.1.2. Caracterizarea materialelor metalice supuse recondiționării

Materialele metalice, alama (SA) și bronzul (cod SB), au fost supuse, de asemenea, investigațiilor chimice și mecanice. Rezultatele obținute pentru compoziția chimică și pentru caracteristicile mecanice [131] se încadrează în prevederile normativelor în vigoare [132, 133]

Analiza chimică s-a efectuat la spectrometrul de emisie optică BAIRD DV-6, în programul SPETROCOMP®, cu achiziție și prelucrare automată a datelor (pentru probe solide).

Analiza morfologică a materialelor metalice [131], realizată în urma studierii imaginilor obținute cu microscopul optic OLYMPUS, evidențiază componentele structurale ale acestora:

**Alama** – microstructură bifazică  $\alpha+\beta'$  cu o proporție de fază  $\beta=16,05\%$  (fig. 2.3-a), ceea ce conferă materialului bune proprietăți de rezistență și tenacitate .

**Bronzul cu Al** - (fig. 2.3-b), microstructură bifazică formată din grăunți fini de soluție solidă  $\alpha$  și eutectoidul ( $\alpha+\gamma_2$ ).

Structura materialelor metalice este alcătuită din două sau mai multe componente cu grăunți fini, distribuiți uniform și proporționați, fapt ce confirmă valorile caracteristicilor mecanice.

## 2.2. Probele testate și tehnologia de realizare a acestora

Materialele supuse investigațiilor tribologice au fost executate sub forma de discuri cu dimensiunile  $\Phi 76$  (96)x6 având rugozitatea  $R_a 1,6$ .

Discurile, acoperite pe o față cu compozit, au fost executate după următoarele operații astfel [131]:

- executare discuri din alamă și bronz conform desen de execuție (fig. 2.4.); pe o față a acestora s-au realizat rizuri de aderență de tip filet cu pasul de 2 mm și adânci de 1-1,5 mm;
- curățare și degresare discuri cu degresant Reiniger (degresant pe bază de solvent organic);
- preparare manuală a compozitului conform rețetei producătorului (amestecarea și omogenizarea celor două componente) urmată imediat de: aplicarea manuală cu șpaclu, întărire și prelucrarea mecanică de finisare (rectificare) a suprafeței cu compozit la cotele finale.

### 2.3. Programele de testare tribologică în regim uscat

Pentru caracterizarea tribologică la frecare de alunecare în regim uscat a cuplurilor de materiale a fost luat în considerare tribomodelul bilă-pe-plan în mișcare rectilinie alternativă, în care triboelementele au fost reprezentate de discuri metalice (alamă și bronz) cu materiale compozite pe de o parte, și o bilă de rulment tipul RB-6/G20W fabricație SKF cu diametrul de 6 mm și duritatea 60 HRC, pe de altă parte. În această configurație au fost derulate două programe de testare:

- a) În programul inițial (tabelul 2.5) au fost variați următorii parametri din tab. 2.5:

Tabelul 2.5  
Programul inițial de testare bilă-pe-plan

Material	Cod material	Cursa [mm]	(Viteza medie) [mm/s]	Forța [N]	Nr. cicluri
Compozit pentru alamă	SAC	2,85	(2,65)	20	4000
Alamă SAE 430B	SA	3,33	(2,90)	30	5000
Compozit pentru bronz	SBC	4	(3,15)	40	6000
Bronz CuAl9Fe3T	SB	5	(3,50)	50	
Moglice	SMC				

Din combinarea parametrilor: c, F și N<sub>c</sub>, au rezultat minim 4·4·3=48 teste pentru fiecare material, 240 teste în total pentru toate cele cinci materiale testate. Lungimile de frecare au fost cuprinse în intervalul 6÷21m. S-a constatat, în urma efectuării testelor după programul de mai sus, că, la anumite materiale și pentru anumiți parametri de testare, coeficientul de frecare nu s-a stabilizat prezentând, spre sfârșitul perioadei de testare, salturi semnificative. O parte din rezultatele acestor teste au fost utilizate pentru modelare cu rețele neuronale a procesului de frecare din cap. 5

- b) În cel de-al doilea program de testare, tot în configurația bilă-pe-plan, au fost stabiliți alți parametri de lucru în conformitate cu recomandările standardului ASTM G133-05 [37]: cursa de 5 mm, lungimea de testare de 100 m, durata testului de 475 min. Forțele de încărcare au fost de 20, 30, 40 și 50 N.

Tabelul 2.6  
Programul de testare la zgâriere

Material	Cod material	Forța normală, [N]
Compozit pentru alamă	SAC	10 30 50
Alamă SAE 430B	SA	
Compozit pentru bronz	SBC	
Bronz CuAl9Fe3T	SB	
Moglice	SMC	

Pentru caracterizarea materialelor din punct de vedere mecanic au fost efectuate teste de zgâriere după programul de testare detaliat în tab. 2.6.

Toate testele experimentale au fost efectuate la temperatura camerei ( $20 \pm 26$  °C) și în condiții de umiditate relativă de  $40 \pm 60\%$ .

## 2.4. Echipamentele de cercetare utilizate

### 2.4.1. Aparatură de testare tribologică în regim uscat

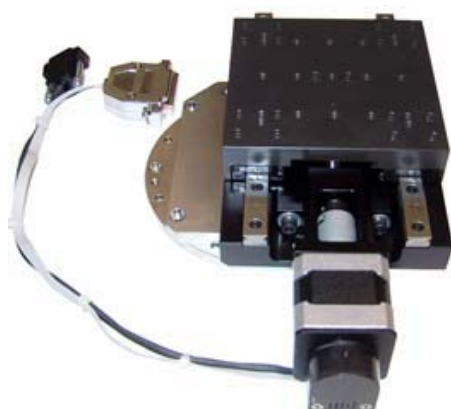
Pentru caracterizarea tribologică a cuplurilor de materiale, la frecarea de alunecare în regim uscat, s-a utilizat **tribometrul universal UMT-2**, CETR, (fig. 2.6.), aflat în dotarea Departamentului de Inginerie mecanică din cadrul Universității "Dunărea de Jos" din Galați [136, 137, 138]. Aparatul este destinat testelor tribologice de tipul: „șift-pe-disc”, „bilă-pe-disc”, „una, două sau trei bile”, „prismă-pe-inel”, „disc-on-disc”, etc.

Tribometrul este conectat la o unitate de control (PC) prevăzută cu un soft special care permite monitorizarea procesului de testare. Prin unitatea de control se stabilesc parametri de testare precum și parametrii de ieșire. Achiziționarea unor parametrilor de ieșire, ca: forța normală, forța de frecare, forța pe direcția x, deplasări, coeficientul de frecare se face eșantionat cu un increment de timp stabilit la începutul testării.



Fig. 2.6.  
Tribometru Universal UMT-2 – CETR  
[136]

Pentru efectuarea testului în configurația bilă-pe-plan se montează modulul specific acestui test (fig. 2.8-a).



a)



b)

Fig. 2.8

Configurația modulului bilă-pe-plan în mișcare alternativă UMT-2 – CETR; a) modulul specific acestei configurații; b) tribometrul UMT-2 cu modulul pentru configurația bilă-pe-plan în mișcare rectilinie alternativă. [136]



Aparatura de achiziție a datelor utilizată pentru efectuarea testelor este inclusă în tribometru și este conectată la un computer care înregistrează eșantionat diverși parametri tribologici (coeficient de frecare, forță de încărcare, forța de frecare, emisia acustică, adâncimea de uzură cumulată a celor două triboelemente, etc.)

Tribometru universal UMT-2, din doatarea Laboratorului de tribologie al Universității Politehnica București, a fost folosit pentru efectuarea testelor de zgâriere pe cele cinci materiale studiate în această lucrare. Pe acesta a fost montat modulul destinat acestui tip de teste și un indenter din diamant cu forma conică și unghiul la vârf de 120°.

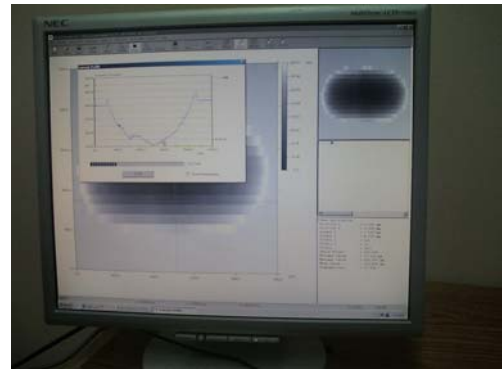
#### 2.4.2. Echipament pentru analiza morfologică

a) Datele privind profilele digitale au fost achiziționale cu profilometrul laser  $\mu$ Scan®, produs de firma NanoFocus din dotarea Facultății de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management a Universității “Ștefan cel Mare” din Suceava (fig. 2.9).

Datele obținute au fost prelucrate cu soft-urile SPIP și Excel.



a)



b)

Fig. 2.9

a) Profilometrul laser  $\mu$ Scan®, produs de firma NanoFocus; b) captură de ecran tipică pentru testarea bilă-pe-plan

b) Datele privind profilele digitale au fost achiziționale și cu profilometrul digital **Surtronic 3+** (fig. 2.10), larg utilizat în studiul tribologic al geometriei suprafeței și au fost prelucrate cu programul **Talypof** (echipament și soft Taylor Hobson®) [140].



a)



b)

Fig. 2.10

Sistemul de achiziție a datelor cu profilometrul Surtronic 3

Pe parcursul efectuării profilogramelor urmelor de uzură s-au utilizat unele din funcțiile expert ale programului cum ar fi funcția de calculare a ariei profilogramei al cărei efect este ilustrat prin capturile de imagine din fig. 2.11.

d) Examinarea suprafeței urmelor de uzură a fost efectuată cu microscopul electronic de baleiaj Quanta 200, (fig. 2.12) produs de FEI Company [141].

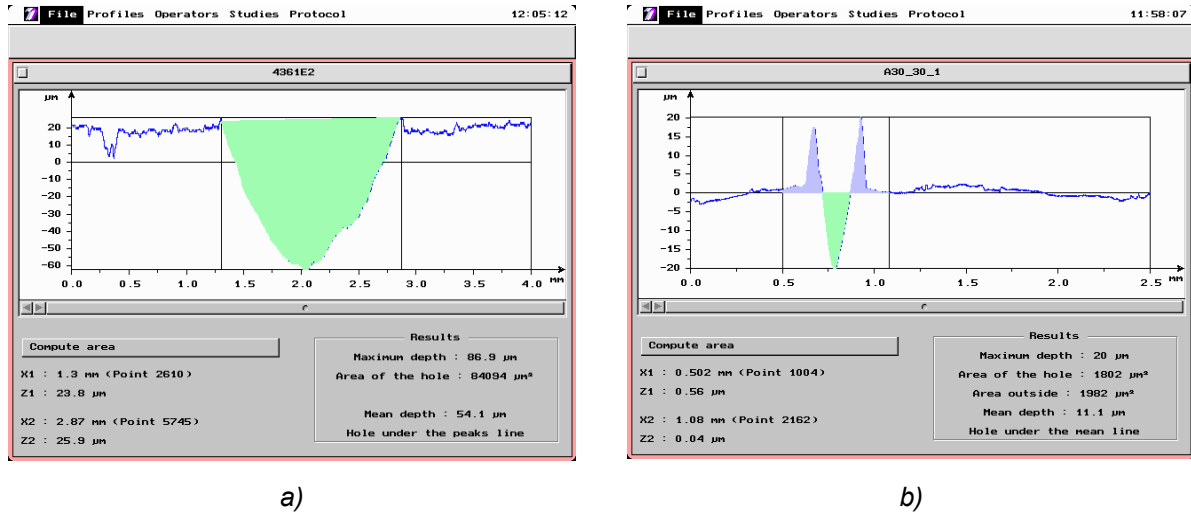


Fig. 2.11

Capturi de imagine de pe monitor: a) profilograma urmei de uzură la testarea bilă-pe-plan; b) profilograma urmei la zgâriere



Fig. 2.12

Microscopul electronic de baleiaj Quanta FEI 200 din dotarea Universității „Dunărea de Jos” din Galați

d)

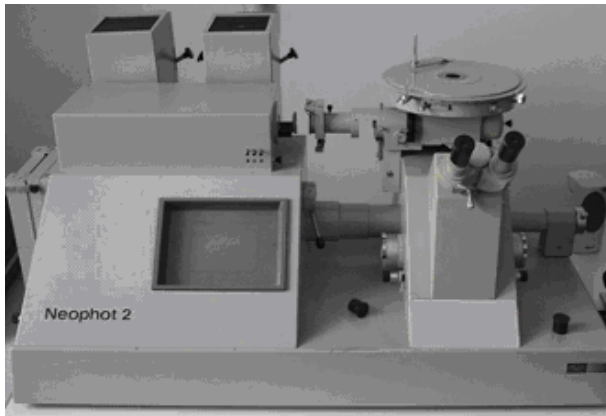


Fig. 2.14

Microscopul optic Neophot-2 din dotarea Universității „Dunărea de Jos” din Galați



Fig. 2.15

Microscopul optic Olympus Bx60m din dotarea SC Uzinsider engineering SA Galați

e) Cu microscopul metalografic Neophot-2 (putere de mărire 10x...1000x), din dotarea Facultății de Ingineria Materialelor și a Mediului a Universității "Dunărea de Jos" din Galați, au fost studiate urmele de uzură ale materialelor studiate obținute în configurația bilă-pe-plan.

f) Analiza morfologică a materialelor studiate a fost efectuată cu microscopul optic Olympus Bx60m [142] din dotarea SC Uzinsider engineering SA Galați (fig. 2.15).

## 2.5. Concluzii

- materialele compozite supuse investigațiilor tribologice sunt materiale de „înaltă performanță” utilizate cu succes în lucrările de recondiționare a pieselor confecționate din materiale metalice solicitate la frecare, alamă și bronz;
- aceste materiale compozite au caracteristici fizice și mecanice remarcabile: raport ridicat caracteristici mecanice/densitate, absorbție de apă – zero, etc.;
- aderența la interfața metal-compozit se realizează la temperatura mediului ambiant prin reacții polimerice ce asigură o bună rezistență la desprindere;
- structura materialelor compozite este foarte fină și compactă, formată din matrice moale ranforsată cu particule dure, de forme diferite (aciculară, sferică, cvasisferică) aflate diverse în proporții;
- programele de efectuarea testelor stabilite de autor, prezentate pe larg în paragraful 2.3, urmărește analizarea, din punct de vedere tribologic, a unor materiale compozite larg folosite în aplicațiile ingineresti de recondiționare a pieselor executate din materiale metalice precum alama și bronzul, materiale frecvent utilizate în construcția lagărelor de alunecare și a altor piese;
- aceleași programe de testare au fost aplicate și materialelor metalice, alama și bronzul, din necesitatea comparării rezultatelor obținute pentru materialele compozite cu cele obținute la testarea materialelor metalice;
- aparatura utilizată (tribometrul universal UMT-2, microscopul electronic, microscopie optice, profilometrul cu laser) este de dată recentă și este utilizată pe larg de majoritatea cercetătorilor din domeniul tribologiei pentru investigații;
- metodologia de testare a avut în vedere conceptul tribomodel ca bază de început în restrângerea ariei de căutare a celor mai potrivite materiale și a regimurilor de lucru pentru tribosistemele reale.



### Capitolul 3

## REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA TRIBOLOGICĂ ÎN REGIM USCAT

### 3.1. Rezultate experimentale privind coeficientul de frecare

În urma efectuării testelor tribologice, s-au calculat și s-au interpretat valorile coeficientului de frecare pentru materialele testate, uzura liniară ( $\Delta U_h$ ), volumul de material uzat ( $V$ ), intensitatea volumică de uzare ( $I_v$ ) precum și coeficientul de uzură. Soft-ul tribometrului UMT-2 furnizează, cu o frecvență de 10 valori achiziționate per secundă, o serie de parametri ca: adâncimea de pătrundere a bilei în materialul discului, coeficientul de frecare, forța normală de încărcare, forța de frecare și alți parametri stabiliți înainte de efectuarea propriu-zisă a testului.

Uzura liniară ( $\Delta U_h$ ) este calculată ca diferență între valoarea curentă a adâncimii de pătrundere a bilei și cea mai mică valoare înregistrată, de regulă, la începutul testului.

Coeficientul de frecare a fost calculat, în fiecare punct de măsurare, cu relația [120, 143]:

$$\mu = \frac{|F_f|}{F} \quad (3.1)$$

Coeficientul de frecare mediu, pe anumite intervale de testare, a fost calculat ca medie aritmetică a valorilor coeficientului de frecare înregistrate pe intervalul de măsurare respectiv:

$$\mu_{med} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (3.2)$$

#### 3.1.1. Calculul presiunii de contact bilă-plan

În configurația de testare tribologică bilă-pe-plan, se formează o cuplă de frecare de clasa I, realizată între cele două elemente ale cuplei tribologice, bila și discul cu suprafața plană (fig. 3.1). Calculul presiunii maxime din punctul de contact a fost efectuată după teoria lui Hertz, când se presupune că sunt îndeplinite toate ipotezele acestei teorii:

În această figură se definesc următoarele elemente:

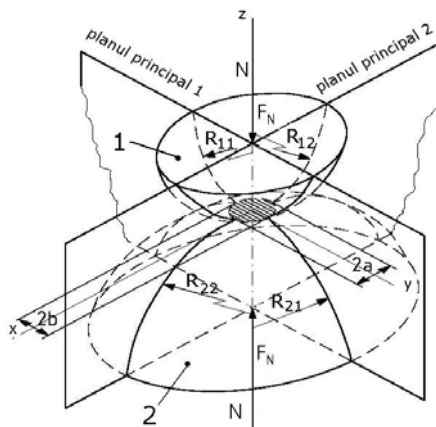


Fig. 3.1.  
Elemente geometrice la contactul  
punctiform [143]

- normala comună a celor două corpuri (N-N), care formează cupla tribologică, este perpendiculară pe planul tangent comun în punctul de contact;
- intersecția planelor principale 1 și 2 ale celor două suprafețe (perpendiculare) este normala N-N;
- razele de curbură ale suprafeței 1 în cele două plane de măsurare sunt:  $R_{1,1}$ ,  $R_{1,2}$ , iar ale suprafeței 2 sunt:  $R_{2,1}$ ,  $R_{2,2}$  (primul indice se referă la suprafață, iar al doilea la planul principal);
- razele de curbură echivalente ale suprafețelor ce formează cupla tribologică, aferente unui plan, sunt [143]:

$$\frac{1}{R_{1(2)}} = \pm \frac{1}{R_{1,1(2)}} \pm \frac{1}{R_{2,1(2)}} \quad (3.3)$$

în care semnul (+) se folosește în cazul suprafețelor convexe, iar semnul (-) pentru cele concave;

Contactul bilă-pe-plan este un caz particular al contactului punctiform, când raza primului corp, bila, are aceeași valoare în cele două plane principale ( $R_1$ ), iar pentru al doilea corp, razele în cele două plane sunt infinite ( $R_2 \rightarrow +\infty$ ). În această situație, relația utilizată pentru calculul presiunii maxime de contact, în condițiile teoriei lui Hertz, obținute prin particularizarea relațiilor din [143], este:

$$p_0 = 0,5784 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_n}{\eta^2 \cdot R_1^2}} \quad (3.4)$$

unde  $F_n$  este forța normală de apăsare, iar  $\eta$  este:

$$\eta = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (3.5)$$

în care:

- $E_1$  și  $E_2$  sunt modulele de elasticitate pentru bila metalică din oțel, respectiv, pentru discurile din materialele de testat;
- $\nu_1$ ,  $\nu_2$  sunt coeficienții Poisson ai materialelor celor două corpuri în contact.

Zona eliptică de contact (în caz general) devine, prin particularizarea contactului punctiform, un cerc a cărei rază este [143]:

$$a = \frac{3}{4} \cdot F_n \cdot \sqrt[3]{\eta \cdot R_1} \quad (3.6)$$

Apropierea relativă,  $\delta$ , dintre suprafețele corpurilor în contact este [143]:

$$\delta = 0,8255 \cdot \sqrt[3]{\frac{(\eta \cdot F_n)^2}{R_1}} \quad (3.7)$$

În tabelul 3.1 sunt prezentate valorile parametrilor: presiunea maximă ( $p_0$ ), raza cercului de contact ( $a$ ) și apropierea relativă ( $\delta$ ) pentru toate materialele testate cu cele patru valori ale forței. Pentru bilă au fost utilizați următorii parametri: raza bilei  $R_1 = 3$  mm,  $E_1 = 210$  GPa și  $\nu_1 = 0,3$ .

Tabelul 3.1  
Calculul presiunii de contact pentru materialele compozite și metalice

Cod	F [N]	E <sub>2</sub> [GPa]	a [mm]	δ [mm]	p <sub>0</sub> [MPa]
SAC	20	5,8	1,13	0,0110	277,53
	30	5,8	1,69	0,0150	307,20
	40	5,8	2,26	0,0182	349,66
	50	5,8	2,82	0,0211	376,66
SA	20	80	0,53	0,0025	1281,03
	30	80	0,79	0,0033	1431,18
	40	80	1,05	0,0039	1613,99
	50	80	1,31	0,0046	1738,62
SBC	20	5,8	1,13	0,0115	277,53
	30	5,8	1,69	0,0150	317,69
	40	5,8	2,26	0,0182	349,66
	50	5,8	2,82	0,0211	376,66
SB	20	90	0,51	0,0024	1351,75
	30	90	0,77	0,0031	1547,37
	40	90	1,02	0,0037	1703,10
	50	90	1,28	0,0043	1834,61
SMC	20	10,4	0,94	0,0079	403,13
	30	10,4	1,40	0,0103	461,47
	40	10,4	1,87	0,0125	507,91
	50	10,4	2,34	0,0145	547,13

### 3.1.2. Evoluția coeficientului de frecare în configurația bilă-pe-plan în mișcare rectilinie alternativă

Încercările de frecare în mediu uscat, în configurația bilă pe plan, cu mișcare rectilinie alternativă, s-au efectuat pe tribometrul UMT-2.

Cupla tribologică bilă-pe-plan este formată din elementul al cărui material se testează, un disc metalic, respectiv un disc cu compozit turnat și o bilă de rulment (®SKF), cu diametrul de 6 mm și cu rugozitatea R<sub>a</sub>=0,025 μm.

Înainte de efectuarea testelor, suprafețele supuse uzurii au fost curățate conform procedurii spălate cu acetonă și uscate cu aer cald.

Rezultatele testelor efectuate după primul program de testare (paragraful 2.3-a) au evidențiat faptul că, pe lungimea de frecare rezultată (6÷21 m), coeficientul de frecare nu s-a stabilizat, motiv pentru care s-a derulat al doilea program de testare prezentat paragraful 2.3 b), pe distanța de frecare de 100 m, conform ASTM G133-05 [37].

Viteza medie a fost calculată cu relația:

$$v_m = \frac{L_f}{t} \quad (3.8)$$

Cu datele obținute s-au trasat diagramele de variație ale coeficientului de frecare în funcție de lungimea de frecare, pentru fiecare material studiat și pentru fiecare forță de încărcare și s-au calculat valorile coeficientului de frecare mediu pe ultimii 25 m (μ<sub>med</sub>), pentru toate materialele și pentru toate forțele de încărcare cu relația (3.2).

O parte a rezultatelor obținute, cele mai reprezentative, după primul program de testare sunt arătate în fig. 3.2÷3.5.

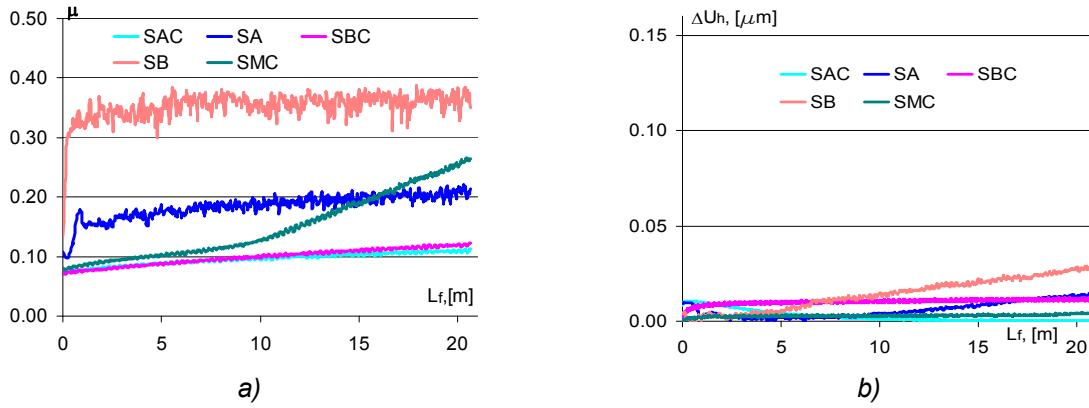


Fig. 3.2.

Rezultatele testelor de frecare în configurația bilă-pe-plan, pe distanța de 21 m, cu forța normală de 20 N: a) variația coeficientului de frecare; b) variația uzurii liniare.

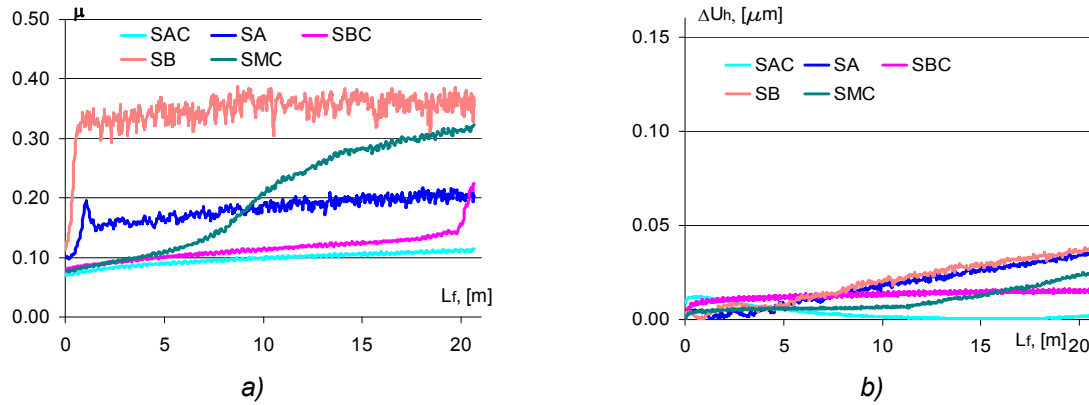


Fig. 3.3.

Rezultatele testelor de frecare în configurația bilă-pe-plan, pe distanța de 21 m, cu forța normală de 30 N: a) variația coeficientului de frecare; b) variația uzurii liniare.

Coeficientului de frecare (fig. 3.2-a÷3.5-a), pentru materialele compozite, nu se stabilizează, în special pentru forțe de încărcare mici, iar materialele metalice apar oscilații locale, cu amplitudine mai mare la bronz comparativ cu alama. Uzura liniară se menține la valori scăzute pentru forțele de frecare de 20÷40 N, dar la forța de 50 N valorile acesteia cresc repede, cu viteze mari.

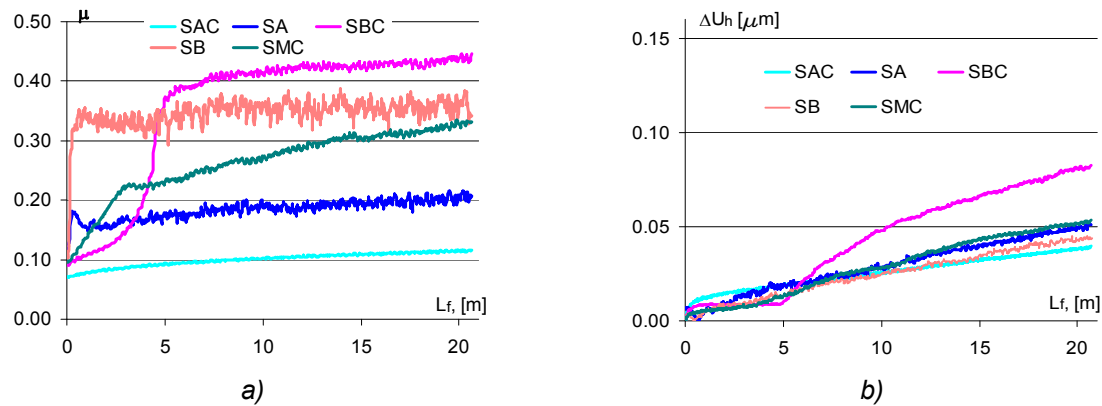


Fig. 3.4.

Rezultatele testelor de frecare în configurația bilă-pe-plan, pe distanța de 21 m, cu forța normală de 40 N: a) variația coeficientului de frecare; b) variația uzurii liniare.

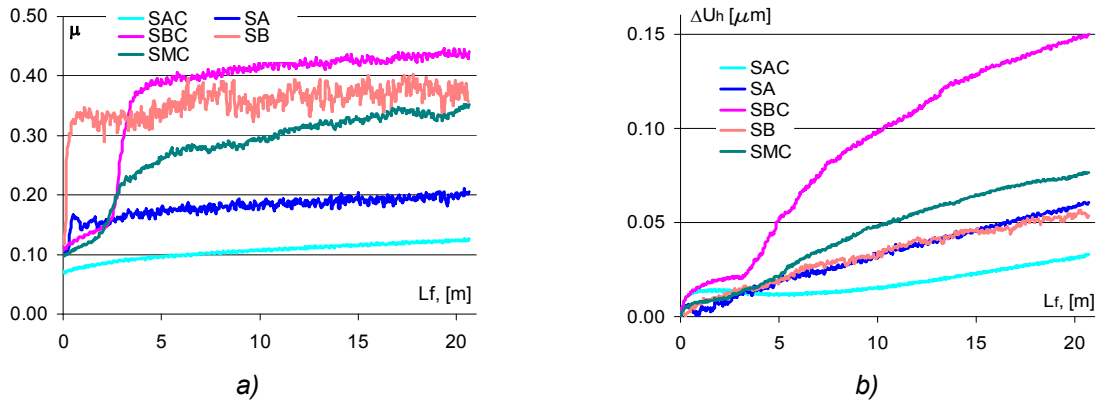


Fig. 3.5.

Rezultatele testelor de frecare în configurația bilă-pe-plan, pe distanța de 21 m, cu forța normală de 50 N: a) variația coeficientului de frecare; b) variația uzurii liniare.

În fig. 3.6÷3.10 sunt arătate variația coeficientului de frecare (a) și coeficientul de frecare mediu (b), în configurația bilă-pe-plan, pe distanța de frecare de 100 m, pentru fiecare material în funcție de forța de frecare.

La compozitul SAC (fig. 3.6) se constată o pantă relativ constantă a diagramei coeficientului de frecare, pe aproape toată lungimea de frecare. O singură excepție se observă pentru forța de 40 N când coeficientul de frecare are o ușoară creștere. Valorile coeficientului de frecare mediu sunt sub 0,17 pentru toate forțele de testare.

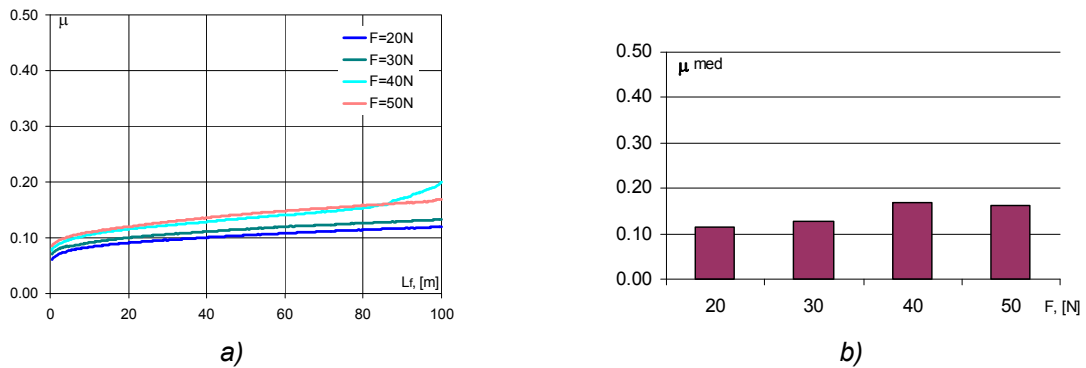


Fig. 3.6.

Variația coeficientului de frecare al compozitului SAC, în configurația bilă pe plan, pe distanța de 100 m: a) coeficientul de frecare; b) coeficientul de frecare mediu pe ultimii 25 m de testare

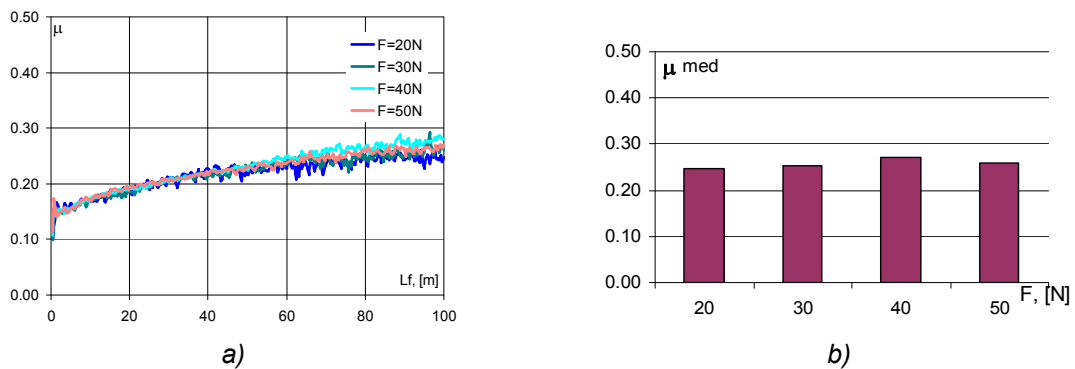


Fig. 3.7.

Variația coeficientului de frecare al alamei, în configurația bilă pe plan, pe distanța de 100 m: a) coeficientul de frecare; b) coeficientul de frecare mediu pe ultimii 25m de testare

La alamă se observă un mic salt în prima etapă (de cca. 2m), la începutul testului și o evoluție grupată a coeficientului de frecare precum și o instabilitate locală a acestuia. Valorile coeficientului de frecare mediu, pentru cele patru forțe de încărcare, sunt comparabile, cu un maxim pentru forța de 40 N.

Compozitul SBC (fig. 3.8), are trei etape în evoluția coeficientului de frecare: în prima etapă, viteza de creștere a coeficientului de frecare este liniară și crește odată cu creșterea forței de încărcare. Lungimea de frecare din această etapă scade odată cu creșterea forței de încărcare. În etapa a doua, viteza de creștere a coeficientului de frecare are valori mult mai mari. În ultima etapă se constată cele mai mici viteze de creștere a coeficientului de frecare precum și cea mai mare instabilitate locală a acestuia. De asemenea, se constată o creștere a valorilor coeficientului de frecare din această etapă de cca. 4 ori față de valoarea din prima etapă. Coeficientul de frecare mediu, calculat pe ultimii 25 m din lungimea de frecare, prezintă variații crescătoare, dar foarte mici la creșterea forței de încărcare.

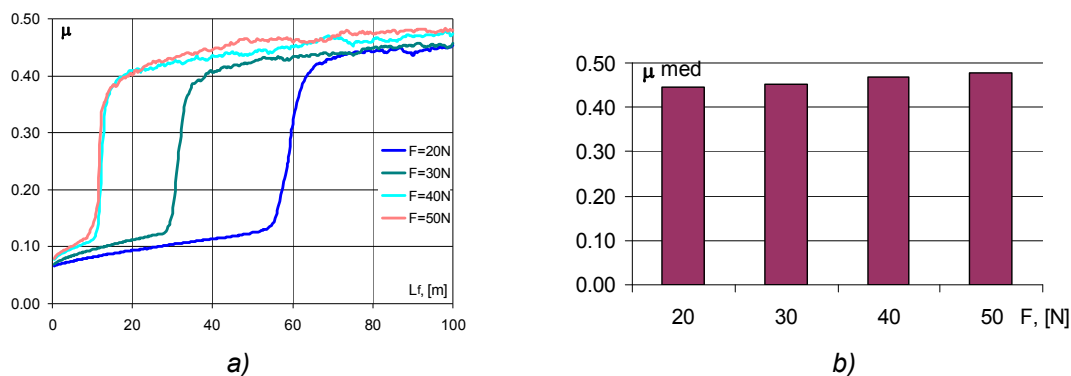


Fig. 3.8.

Variația coeficientului de frecare al compozitului SBC, în configurația bilă pe plan, pe distanța de 100 m: a) coeficientul de frecare; b) coeficientul de frecare mediu pe ultimii 25 m de testare

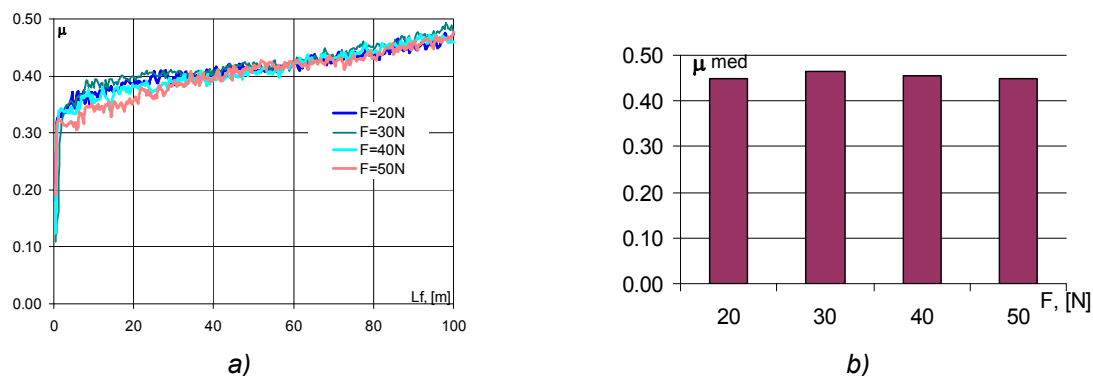


Fig. 3.9.

Variația coeficientului de frecare al bronzului, în configurația bilă pe plan, pe distanța de 100 m: a) coeficientul de frecare; b) coeficientul de frecare mediu pe ultimii 25m de testare

Concluzii asemănătoare cu cele constatate la alamă se desprind din graficul de variație a coeficientului de frecare al bronzului (fig. 3.9-a) precum și din diagrama coeficientului de frecare mediu prezentată în fig. 3.9-b. În privința coeficientului de frecare mediu (fig. 3.9-b) se constată valori aproximativ egale pentru cele patru forțe de testare, cu o ușoară creștere pentru forța de 30N.

Diagrama de variație a coeficientului de frecare pentru compozitul *moglice* (fig. 3.10-a) este asemănătoare cu cea a compozitului pentru bronz. Deosebirea constă în lungimea foarte mică a primei etape, maxim 10 m, viteza de creștere a coeficientului de frecare din etapa a II-a mai mică precum și creșterea acestuia de numai 3 ori față de valoarea din prima

etapă. Valorile coeficientului de frecare mediu (tab. 3.2) pentru compozitul moglice sunt foarte apropiate pentru cele patru forțe de încărcare.

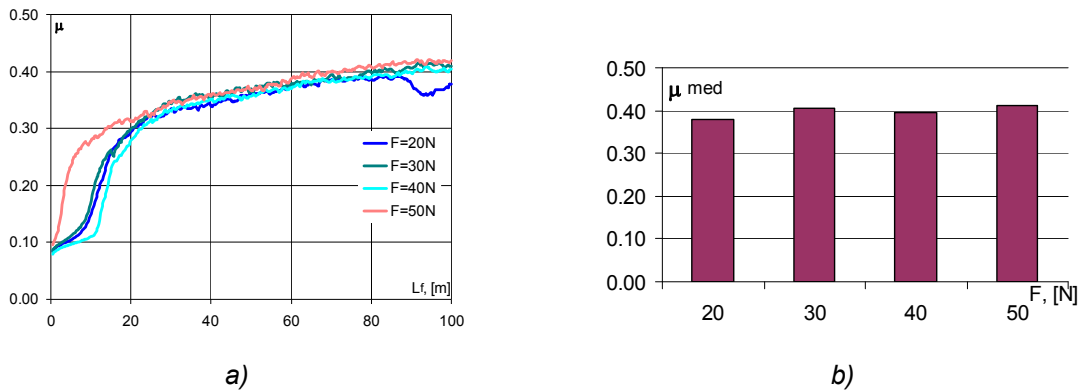


Fig. 3.10.  
Variația coeficientului de frecare al compozitului SMC, în configurația bilă pe plan, pe distanța de 100 m: a) coeficientul de frecare; b) coeficientul de frecare mediu pe ultimii 25 m de testare

Tabelul 3.2  
Coeficientul mediu la frecare uscată în configurația bilă-pe-plan calculat pentru ultimii 25 m

Nr. crt.	Materialul	F=20N	F=30N	F=40N	F=50N
1.	Compozit pentru alamă	0,116	0,128	0,167	0,161
2.	Alamă	0,245	0,253	0,271	0,259
3.	Compozit pentru bronz	0,444	0,450	0,466	0,477
4.	Bronz	0,449	0,463	0,455	0,449
5.	Compozitul moglice	0,379	0,404	0,396	0,412

Din analiza diagramelor din figurile de mai sus, se desprind următoarele concluzii:

- în evoluția coeficientului de frecare a compozitului SBC, se observă, în etapa de început a testării, pentru cele patru forțe de încărcare, diferențe în ceea ce privește viteza de creștere cât și lungimea acestei etape;
- la compozitul SAC, la forța de încărcare de 40 N, coeficientul de frecare nu se stabilizează după parcurgerea lungimii de frecare de 100 m;

### 3.1.3. Comparație privind coeficientul de frecare mediu în funcție de metoda de testare

În acest paragraf se compară coeficientul de frecare mediu obținut prin două metode de testare: bilă-pe-plan și știft-pe-disc pentru materialele studiate. Acesta a fost calculat ca medie a valorilor coeficientului de frecare achiziționate pe ultimele 300 s (244,5 m) din durata testului.

Testele știft-pe-disc au fost efectuate în cadrul proiectului de cercetare [131] cu un știft din oțel de calitate C45 cu dimensiunile  $\Phi 6,25 \times 25$ . Testele au fost efectuate cu următorii parametri: viteza de alunecare,  $v=0,815$  m/s; durata unui test,  $t=50$  min; lungimea de frecare,  $L_f=2445$  m; temperatura ambiantă (T):  $20 \pm 25$  °C; umiditate relativă ( $\varphi$ ):  $40 \pm 60\%$ .

Înainte de testare s-a făcut un rodaj de 10 minute în aceeași parametri de testare.

Rezultate obținute sunt prezentate în tabelul 3.3, iar în fig. 3.14 și 3.15 sunt graficele coeficientului de frecare mediu.

Tabelul 3.3  
Coeficientul mediu la frecare uscată în configurația știft-pe-disc, calculat pentru ultimele 300 s

Nr. crt.	Materialul	F=30N	F=40N	F=60N
1.	Compozit pentru alamă	0,485	0,577	0,469
2.	Alamă	0,489	0,432	0,264
3.	Compozit pentru bronz	0,438	0,518	0,480
4.	Bronz	0,603	0,557	0,443
5.	Compozitul <i>moglice</i>	0,237	0,371	0,453

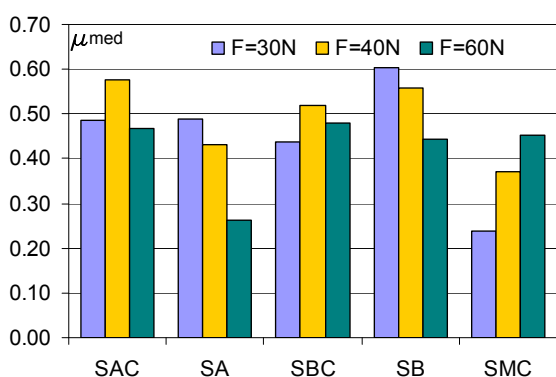


Fig. 3.14

Coeficientul de frecare mediu, în configurația știft-pe-disc, în funcție de material pentru cele trei forțe de încărcare

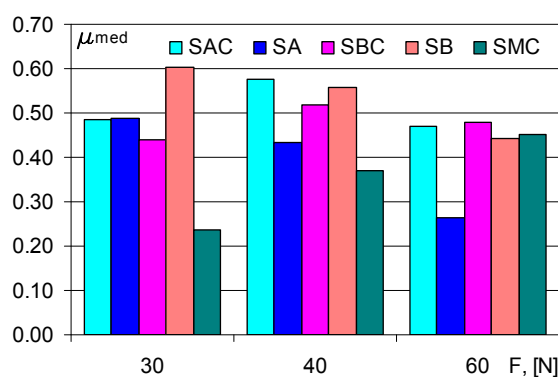


Fig. 3.15

Coeficientul de frecare mediu, în configurația știft-pe-disc, în funcție de forța de încărcare pentru toate materialele

Din analiza diagramelor coeficientului de frecare mediu (fig. 3.14 și 3.15), pentru configurația știft-pe-disc, se observă că:

- coeficientul de frecare mediu se modifică cu forța de încărcare;
- la materialele metalice, acesta descrește odată cu creșterea forței de încărcare, iar la compozitul SMC variația este inversă;
- La materialele compozite, SAC și SBC, coeficientul de frecare mediu are valoarea cea mai mare pentru forța F=40N;

## 3.2. Rezultate experimentale privind parametrii de uzură

### 3.2.1. Generalități

Un parametru sugestiv pentru caracterizarea tribologică a materialelor studiate este adâncimea de uzare ( $\Delta U_h$ ) obținută în urma efectuării testelor de frecare uscată în configurația bilă-pe-plan cu mișcare rectilinie alternativă, pe tribometrul UMT-2.

De asemenea, cu profilometrul laser  $\mu$ Scan® a fost scanată suprafața urmei de uzură, iar, cu ajutorul unui program conceput în AutoLISP (Anexa A3) și rulat în AutoCAD 2009, au fost trasate profilograme în trei zone ale urmei: mediană ( $m$ ), spre exteriorul ( $e$ ) și interiorul ( $i$ ) discului de testat, la distanță de 2 mm de zona mediană. Cu ajutorul comenzii LIST au fost obținute valorile ariei ( $A_i$ ,  $i=1,2,3$ ) și lățimii ( $\Delta x_i$ ,  $i=1,2,3$ ) celor trei profilograme din zonele  $i$ ,  $m$  și  $e$  (fig. 3.16).

Calculul ariei unei profilograme (3.9) a avut la bază formula trapezelor [127, 144]:



$$A_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (y_i + y_{i-1})(x_i - x_{i-1}) \quad (3.9)$$

unde:

$x_i$  și  $y_i$  – coordoatele unui punct de pe profilogramă într-un sistem cartezian propriu;  
 $N$  – numărul de puncte de pe profilogramă.

Aria urmei de uzură a secțiunii transversale a profilogramei a fost calculată ca medie a celor trei arii din figura 3.16:

$$A_w = \sum_{i=1}^3 A_i \quad (3.10)$$

Cu ajutorul acestor informații au fost calculați parametri de uzură [3, 28]: volumul de material uzat ( $V$ ), intensitatea de uzură volumică ( $I_v$ ) și coeficientul de uzură ( $k$ ). Acești parametri au fost calculați ca medie a valorilor obținute pentru cele trei plane de măsurare din figura 3.16.

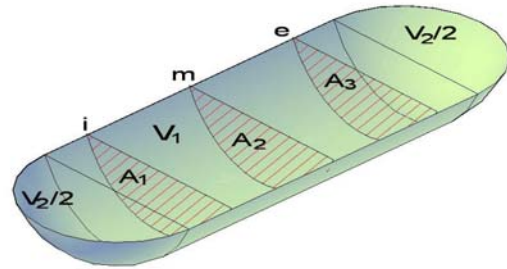


Fig.3.16.  
 Schema de calcul a ariei medii și a volumului de material uzat

### 3.2.2. Rezultate privind parametrii de uzură

#### 3.2.2.1. Uzura liniară

În urma testelor de frecare uscată, în mișcare rectilinie alternativă, pe distanța de frecare de 100 m, realizate în condițiile prezentate în paragraful 2.3, s-a monitorizat și interpretat uzura liniară a materialelor supuse investigațiilor tribologice. Rezultatele investigațiilor privind uzura liniară pentru toate cele cinci materiale studiate sunt prezentate în fig. 3.18÷3.22.

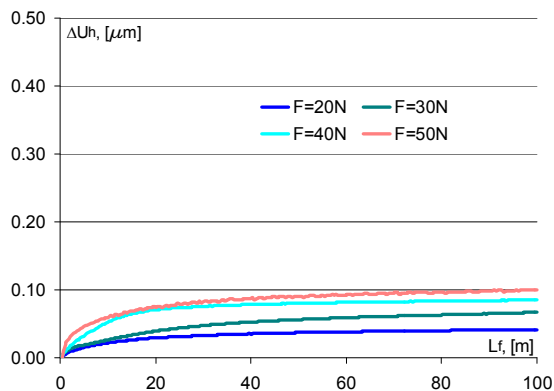


Fig.3.18

Variația uzurii liniare a compozitului SAC, în configurația bilă pe plan, pe distanța de 100 m

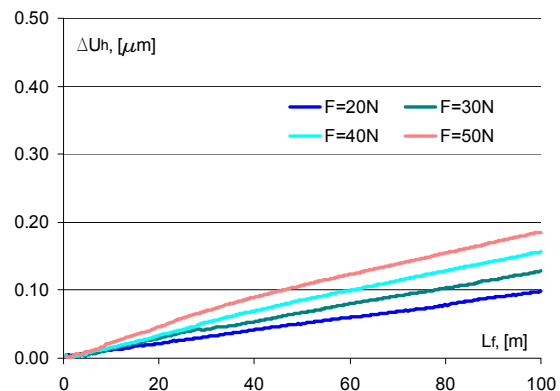


Fig.3.19

Variația uzurii liniare a alamei, în configurația bilă pe plan, pe distanța de 100 m

Uzura liniară, în cazul materialului compozit pentru alamă, (fig. 3.18) prezintă două etape de evoluție: în prima etapă (de aproximativ 10-15m) are loc o creștere rapidă a uzurii liniare când se netezesc asperitățile de pe suprafața probelor. În continuare, în etapa a II-a, viteza de creștere a uzurii liniare se reduce continuu. De asemenea, se constată că viteza de creștere a uzurii liniare crește odată cu creșterea forței de încărcare. În comparație cu

materialul compozit, la materialul metalic, alamă, uzura liniară prezintă o creștere continuă (fig. 3.19), fenomen caracteristic și celuilalt material metalic (fig. 3.21), bronzul.

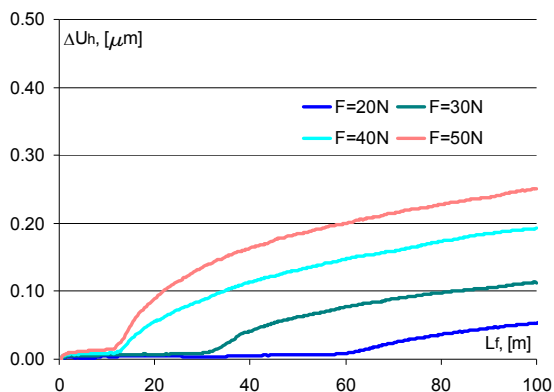


Fig.3.20

Variația uzurii liniare a compozitului pentru bronz, în configurația bilă pe plan, pe distanța de 100 m

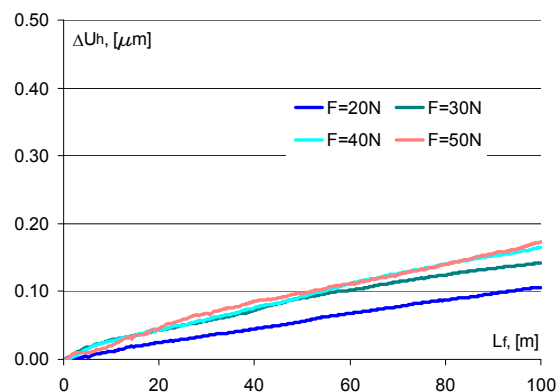


Fig.3.21

Variația uzurii liniare a bronzului, în configurația bilă pe plan, pe distanța de 100 m

Pentru materialul compozit pentru bronz (fig. 3.20), se constată două etape de evoluție a uzurii liniare. Într-o primă etapă, variabilă descrescătoare cu creșterea forței (de la 10 la 60 m), uzura liniară are o viteză de creștere foarte mică. În etapa a II-a are loc o creștere rapidă a uzurii liniare, cu o viteză care crește odată cu forța de încărcare. În continuare are loc o reducere lentă a vitezei de creștere a uzurii liniare. Urmează, apoi salt datorită aplatizării proeminențelor particulelor metalice înglobate în structura materialului compozit. La bronz (fig. 3.21) se constată viteze de creștere liniare, relativ constante ale uzurii liniare. Și în acest caz vitezele de creștere mai mari se observă la extremitatea de jos a domeniului de forțe studiat.

La compozitul SMC se observă (fig. 3.22) că uzura liniară are o variație asemănătoare cu cea a compozitului pentru bronz pentru forțele de încărcare de 30, 40 și 50 N, dar cu durata primei etape mult mai scurtă (de cca. 3 ori). De asemenea, se constată valori mai mici ale uzurii liniare comparativ cu compozitul SBC de aproximativ 40%. Pentru forța de încărcare de 20 N, uzura liniară are o evoluție diferită de a celorlalte forțe de încărcare. Într-o primă etapă (de cca. 7 m) valorile uzurii liniare scad ceea ce s-ar traduce printr-o îndepărtare a contrapiesei de proba testată.

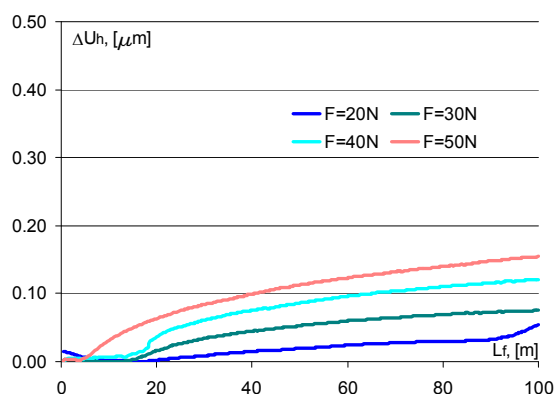


Fig.3.22

Variația uzurii liniare a compozitului SMC, în configurația bilă pe plan, pe distanța de 100 m

Din graficele prezentate mai sus (fig. 3.18÷3.22) se observă:

- valori mici pentru uzura liniară la compozitul SAC comparativ cu celelalte materiale;
- valori mici pentru uzura liniară se întâlnesc și la compozitul SMC;
- compozitul SBC are valori ale uzurii liniare mai mari decât materialul metalic corespunzător;

- uzura liniară are o creștere aproximativ constantă în cazul materialelor metalice;
- în cazul materialelor compozite, aceasta are comportamente diferite: la compozitul pentru alamă, în faza inițială, se constată o creștere accentuată după care urmează o creștere liniară cu o pantă foarte mică; la celelalte două compozite, uzura liniară are creștere mică la început urmată, apoi, de o creștere apreciabilă; valori mai ridicate se observă la compozitul pentru bronz;
- uzura liniară prezintă creșteri odată cu creșterea forței de încărcare atât pentru materialele compozite cât și pentru materialele metalice;

### 3.2.2.2. Uzura volumică

În urma testelor de frecare uscată, în mișcare rectilinie alternativă, pe distanța de frecare de 100 m, au fost calculați următorii parametri de uzură volumică: volumul de uzură ( $V$ ), intensitatea uzurii ( $I_v$ ) și coeficientul de uzură ( $k$ ). Acești parametri au fost calculați în conformitate cu recomandările standardului american ASTM G133-05 [37], pe baza volumului de material uzat strict numai de pe porțiunea cilindrică a urmei de uzură.

Pentru calcularea parametrilor de uzură volumică au fost folosite datele achiziționate cu profilometrul cu laser. Rezultatele sunt prezentate în fig. 3.23÷3.25.

Se observă, din diagramele prezentate în fig. 3.23÷3.25 următoarele:

- materialul compozit pentru alamă are cele mai scăzute valori ale parametrilor de uzură volumică;
- toți parametrii de uzură volumică ai compozitului pentru alamă au o tendință de creștere liniară;
- compozitul pentru bronz, are pentru toți parametrii de uzură volumică valori mai mici decât ale bronzului pentru valori ale forței normale de până la cca. 43 N, când poate fi folosit cu succes în lucrările de recondiționare a pieselor metalice din bronz;
- la compozitul pentru bronz se constată o creștere accentuată a valorilor volumului de material uzat pentru valori ale forței normale mai mari de 30N;
- referitor la coeficientul de uzură ( $k$ ), se observă o reducere accentuată a valorilor în cazul materialelor metalice, alamă și bronz, la acesta din urmă, curba de variație având chiar o tendință de descreștere explicabilă prin reducerea intensității de uzare raportată la forțe cu valori ridicate (40N, 50N);
- compozitul SMC, comparat cu materialele metalice din punct de vedere al parametrilor de uzură volumică, pare a fi un material bun pentru recondiționarea atât a pieselor din alamă cât și a celor din bronz.

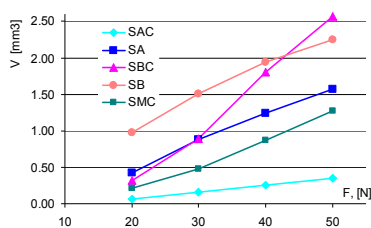


Fig.3.23  
Variația volumului de material uzat în funcție de forța normală, în configurația bilă-pe-plan

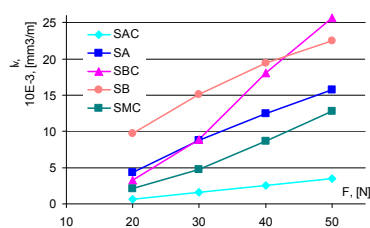


Fig.3.24  
Variația intensității de uzură în funcție de forța normală, în configurația bilă-pe-plan

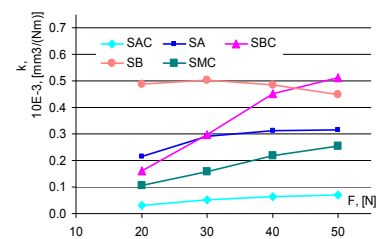


Fig.3.25  
Variația coeficientului de uzură în funcție de forța normală, în configurația bilă-pe-plan

### 3.3. Analiza profilometrică

Rezultatele obținute pentru variația coeficientului de frecare și, mai ales, a parametrilor de uzură pot fi corelate și interpretate cu mai multă acuratețe dacă vor fi luate în considerare și rezultatele analizei profilometrice.

Toate materialele studiate au fost investigate cu profilometrul cu laser  $\mu$ Scan®, produs de firma NanoFocus. Urmele de uzură, obținute prin frecare uscată pe distanța de 100 m, au fost scanate 2D perpendicular pe direcția mișcării: la mijlocul urmei (m) și de o parte și de alta (e, i), la distanță de 2 mm, de aceasta (fig. 3.16). De asemenea, au fost executate și măsurători de profilometrie 3D, pe suprafețe de  $4 \times 7 \text{ mm}^2$ , pentru urmele de uzură obținute la încărcări ale forței normale de 30 și 40 N. Scanarea urmelor de uzură s-a făcut cu pasul liniar de  $5 \mu\text{m}$ , iar datele achiziționate au fost prelucrate cu soft-urile SPIP 6.2.6 (™ Image Metrology, Hørsholm) și Excel.

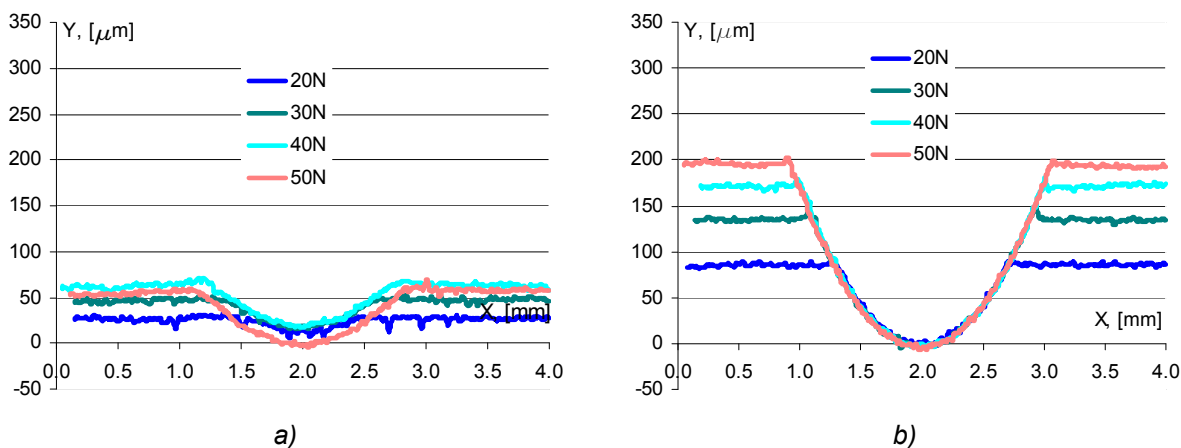


Fig.3.27.

Profilograme 2D, în configurația bilă-pe-plan, pentru: a) compozitul pentru alamă; b) alamă

În fig. 3.27÷3.29 sunt prezentate cele mai reprezentative profilograme 2D ale secțiunii transversale ale urmelor de uzură pentru fiecare material în funcție de valorile forței normale de încărcare.

Parametrii precum lățimea și adâncimea secțiunii transversale a urmei de uzură sunt semnificativ mai mari la compozitul SAC (fig. 3.27-a) decât parametrii similari ai alamei (3.27-b), în special adâncimea urmei de uzură.

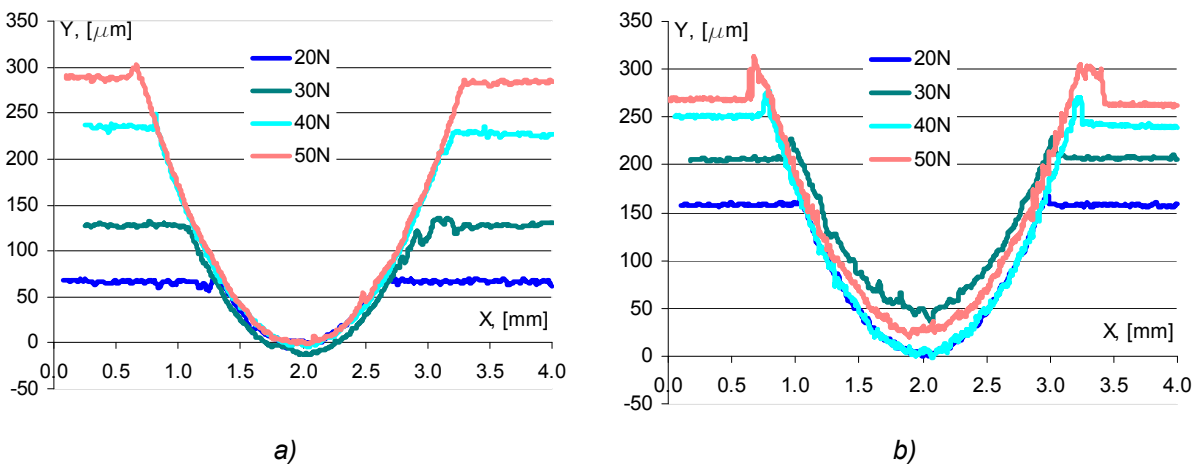


Fig.3.28.

Profilograme 2D, în configurația bilă-pe-plan, pentru: a) compozitul pentru bronz; b) bronz

Analizând profilogramele 2D din fig. 3.28 ale compozitului pentru bronz (fig. 3.28-a) și bronzului (fig. 3.28-b) se constată valori apropiate ale parametrilor acestor profilograme pentru anumite valori ale forței de testare, iar în alte cazuri diferențele sunt apreciable.

Astfel, pentru forța de 40 N și 50 N, parametrii urmei de uzură (lățimea și adâncimea urmei) sunt apropiați. Valori diferite se constată la forțele de încărcare de 20 și 30 N.

Materialul compozit SMC prezintă profilograme 2D (fig. 3.29), ca ordin de mărime a parametrilor lățimea și adâncimea urmei de uzură, între compozitul SAC și celelalte materiale. La compozitul moglice, pentru forța de testare de 20 N, se constată același aspect rugos al profilogramei, ca la compozitul SAC.

Pentru urmele de uzură rezultate în urma testelor de frecare uscată în configurația bilă-pe-plan, pe distanța de 100 m, s-au efectuat măsurători 3D. Aceste măsurători au fost efectuate pe tribometrul UMT-2 cu ajutorul modulului de profilometrie 3D PRO-500 cu contact.

Pentru fiecare urmă de uzură s-au efectuat câte trei scanări: în centrul urmei de uzură (m) și de o parte (e) și de alta (i) a acesteia la cca. 2 mm. Suprafața scanată a fost de 500μm x 500μm. Valorile digitale au fost achiziționate cu pasul de 5 μm.

În fig. 3.30÷3.34 sunt arătate imagini reprezentative detaliate ale urmelor de uzură obținute cu modulul de profilometrie 3D al tribometrului UMT-2, pentru configurația de testare bilă-pe-plan.

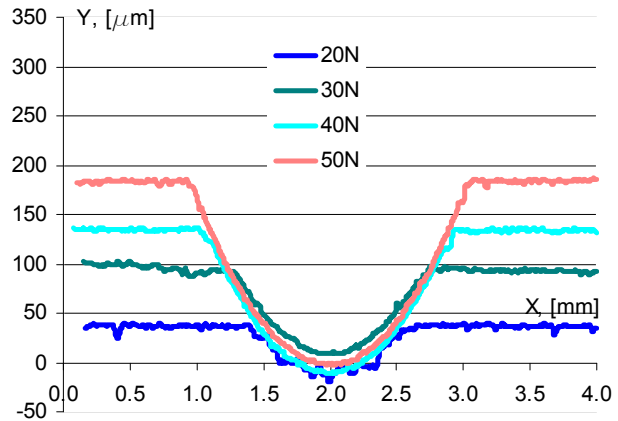


Fig.3.29.  
Profilograme 2D pentru compozitul moglice, în configurația bilă-pe-plan

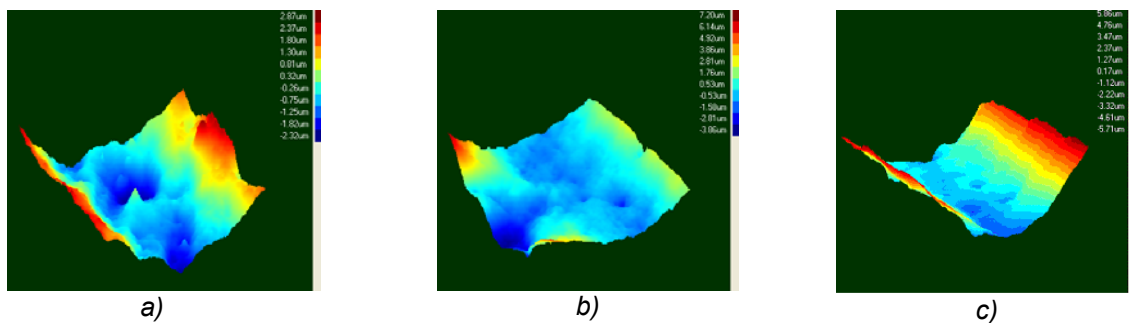


Fig.3.30.  
Profilograme 3D pentru compozitul SAC, configurația bilă-pe-plan,  $L_f=100$  m: a)  $F=20N$ ; b)  $F=30N$ ; c)  $F=50N$

În fig. 3.30 sunt prezentate detalii ale urmelor de uzură pentru compozitul SAC. Se observă adâncituri pe suprafața uzată, mai accentuate pentru forțele de 20 N și 30 N. Pe măsură ce forța de încărcare crește, se atenuază și mărimea acestor adâncituri.

Acestea par a fi efectele unei uzuri adezive când particule din compozit sunt smulse și îndepărtate de pe suprafața supusă frecării. Nu se observă, în schimb, manifestări ale uzurii de abraziune.

Pentru alamă, fig. 3.31, sunt evidente efectele uzurii prin abraziune: rizuri, canale, brăzdări, etc. Se mai observă mici lipituri pe suprafața uzată a căror număr crește odată cu creșterea forței de încărcare.

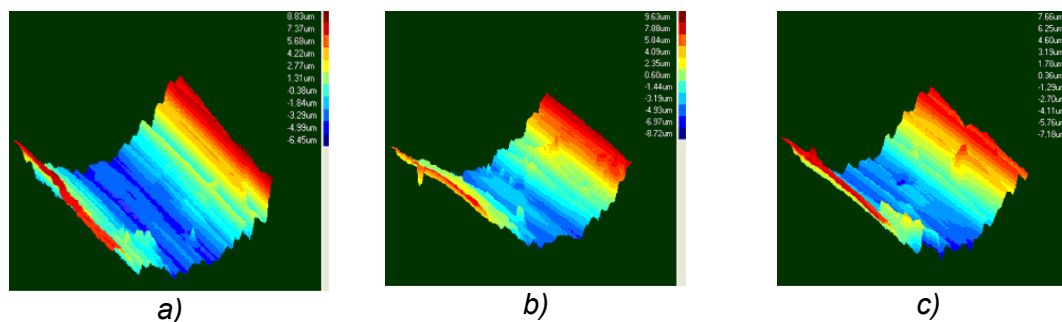


Fig.3.31.

Profilograme 3D pentru alamă, configurația bilă-pe-plan,  $L_f=100$  m: a)  $F=30N$  b)  $F=40N$ ; b)  $F=50N$

Compozitului SBC (fig. 3.32) prezintă manifestări ale fenomenelor de uzură asemănătoare cu cele de la compozitul pentru alamă. Se observă desprinderi de particule de material precum și lipiri ale acestuia pe suprafața uzată. Aceste manifestări cresc în intensitate și ca pondere odată cu creșterea forței normale de testare. Uzura dominantă este cea de adeziune.

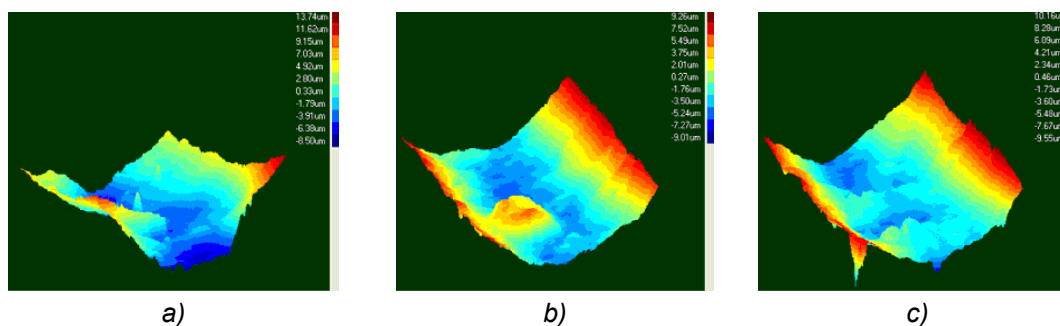


Fig.3.32.

Profilograme 3D pentru compozitul SBC, configurația bilă-pe-plan,  $L_f=100$  m: a)  $F=20N$ ; b)  $F=40N$ ; c)  $F=50N$

La bronz (fig. 3.33), detaliile 3D ale urmelor de uzură sunt asemănătoare cu cele de la alamă. Ondulațiile locale mici sunt mai evidente la bronz comparativ cu alama. Lipirile de material pe suprafața uzată sunt mai numeroase decât la alamă și mai mari ca volum. Se poate spune că în acest caz uzură predominantă este cea de abraziune.

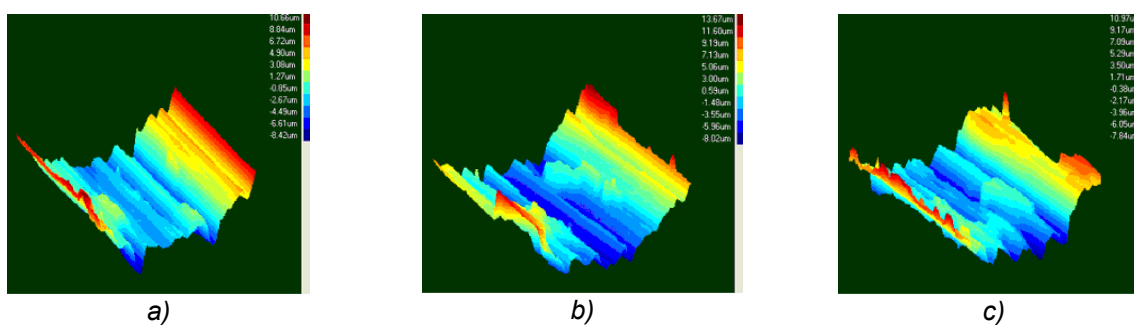


Fig.3.33.

Profilograme 3D pentru bronz, configurația bilă-pe-plan,  $L_f=100$  m: a)  $F=30N$ ; b)  $F=40$ ; c)  $F=50$

Compozitul SMC, detaliile 3D (fig. 3.34) prezintă aceleași aspecte semnalate și la celelalte compozite studiate: protuberanțe și adâncituri care ar putea proveni din desprinderile și lipirile de material de și pe suprafața uzată. Aceste manifestări sunt specifice uzurii de adeziune. Spre deosebire de compozitele SAC și SBC, la acest compozit, protuberanțele și desprinderile de material sunt mai mari la forțe de încărcare mai mici



( $F=20\text{N}$  și  $30\text{N}$ ). La forțe de încărcare mai mari ( $F=40\text{N}$  și  $50\text{N}$ ) amplitudinea acestora este mai mică, pe suprafață apărând tendințe de netezire a asperităților.

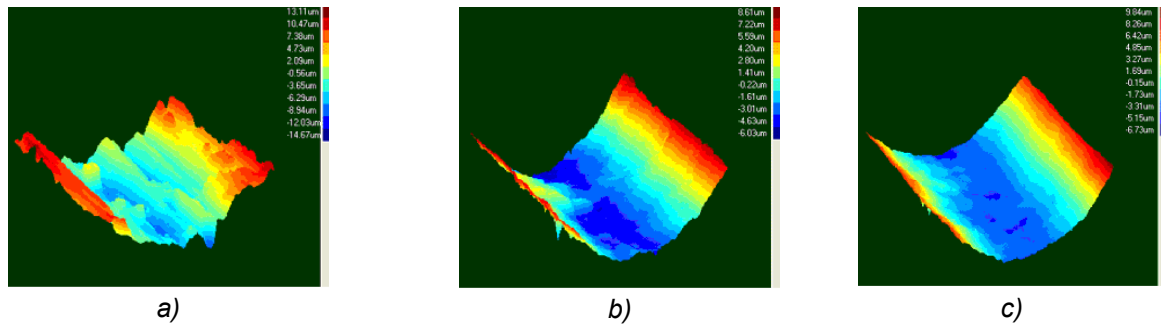


Fig.3.34.

Profilograme 3D pentru compozitul moglice, configurația bilă-pe-plan,  $L_f=100\text{ m}$ :  
a)  $F=20\text{N}$ ; b)  $F=40\text{N}$ ; c)  $F=50\text{N}$

### 3.4. Analiza morfologică

Urmele de uzură după testarea uscată în configurația bilă-pe-plan în mișcarea rectilinie alternativă au fost examinate la microscopul optic Neophot-2. Imaginile au fost realizate la scara de mărire 2,5x și 12,5x. Cele mai relevante imagini sunt prezentate în fig. 3.35÷3.39.

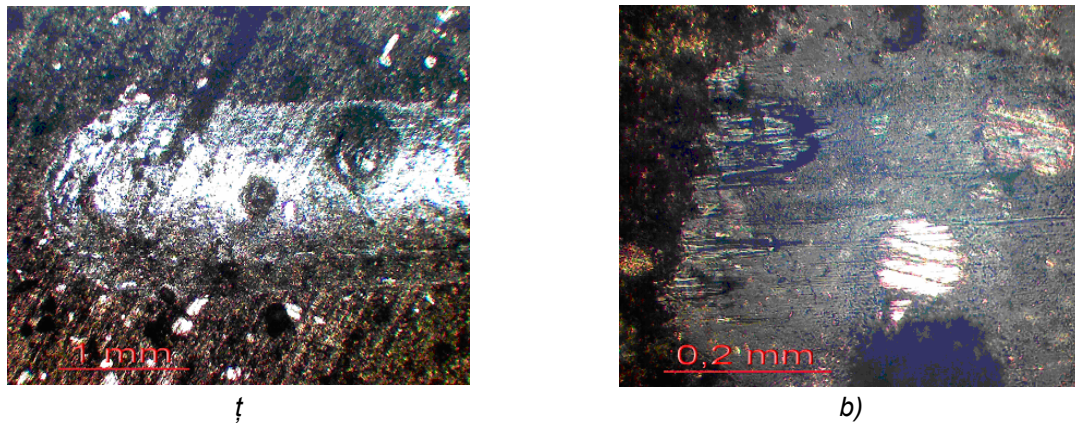


Fig.3.35.

Imagini reprezentative ale urmelor de uzură obținute la microscopul optic Neophot-2 ale compozitului SAC, ( $L_f=100\text{ m}$ ,  $c=5\text{ mm}$ ,  $t=475\text{ min}$ ): a) forța  $F=30\text{N}$ , mărire 2,5x; b) forța  $F=30\text{N}$ , mărire 12,5x;

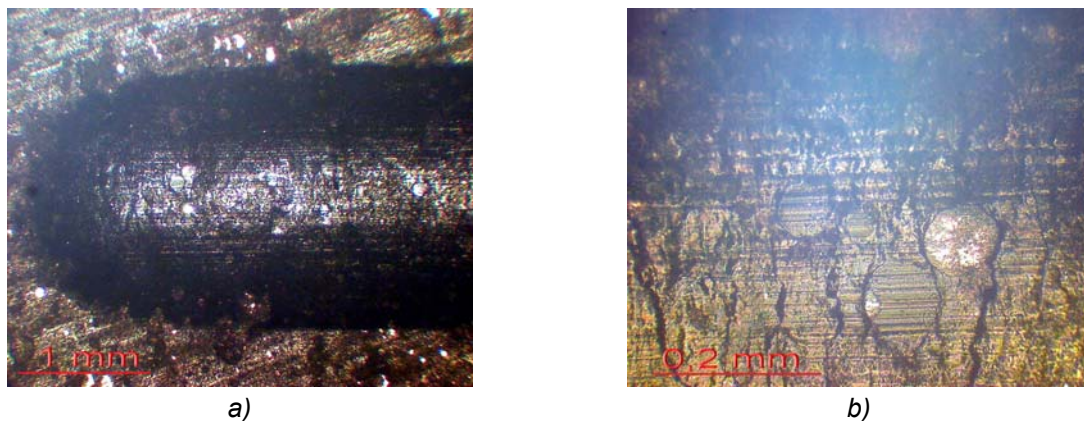


Fig.3.36.

Imagini reprezentative ale urmelor de uzură obținute la microscopul optic Neophot-2 ale compozitului SBC ( $L_f=100\text{ m}$ ,  $c=5\text{ mm}$ ,  $t=475\text{ min}$ ): a) forța  $F=30\text{N}$ , mărire 2,5x; b) forța  $F=30\text{N}$ , mărire 12,5x

Imaginile optice ale compozitului SAC (fig. 3.35), SBC (fig. 3.36) și moglice (fig. 3.37) evidențiază, pe particulele metalice de ranforsant, rizuri, zgârieturi care sunt efecte ale uzurii de abraziune. De asemenea, pe lângă particulele de ranforsant înglobate în matrice, au apărut goluri, dislocări la limita particulelor de dimensiuni mari. Se mai constată smulgeri de material și fisuri perpendiculare pe direcția mișcării, în special, la compozitele SBC și SMC.

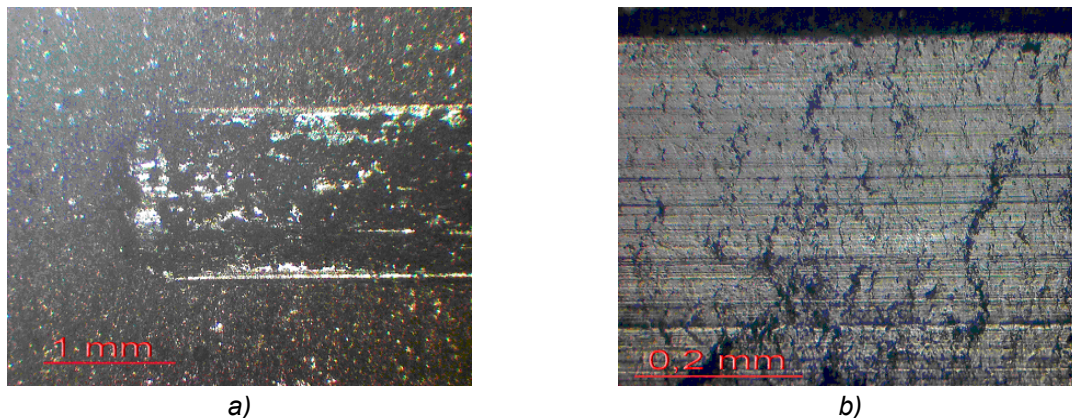


Fig.3.37.

Imagini ale urmelor de uzură obținute la microscopul optic Neophot-2 ale compozitului SMC ( $L_f=100$  m,  $c=5$  mm,  $t=475$  min): a) forța  $F=20$ N, mărire 2,5x; b) forța  $F=20$ N, mărire 12,5x;

Din studierea imaginilor optice ale urmelor de uzură ale materialelor compozite rezultă:

1. se constată că uzura abrazivă, pe lângă cea adezivă, are o pondere destul de importantă, aspect care nu s-a evidențiat destul de bine din analiza detaliilor 3D obținute cu modulul de profilometrie 3D al tribometrului UMT-2;
2. de asemenea, imaginile optice achiziționate prezintă fisuri care apar, în special, la limita particulelor de ranforsat precum și la limita dintre aglomerările de particule;
3. uzura adezivă este prezentă la materialele compozite, efectele ei manifestându-se prin desprinderi de material (adâncituri, scobituri).

În fig. 3.38 sunt arătate imagini optice achiziționate cu microscopul Neophot-2, reprezentative pentru alamă, iar în fig. 3.39 sunt cele pentru bronz. Asemănările privind modul de comportare la uzură precum și efectele acestuia justifică o caracterizare comună a acestor materiale metalice. Se constată că uzura dominantă în cazul celor două materiale metalice este cea de abraziune. Se observă, pe suprafețele urmelor de uzură, șanțuri, zgârieturi și rizuri specifice acestui tip de uzură cu valori mai mari la bronz. Totodată, pe suprafața urmelor de uzură ale alamei, se observă smulgeri de material a căror întinderi cresc odată cu creșterea

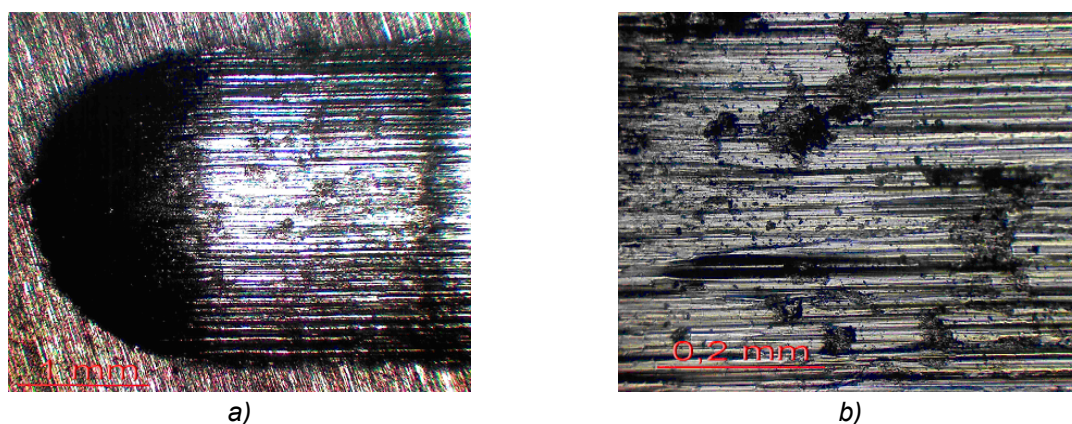


Fig.3.38.

Imagini ale urmelor de uzură, obținute la microscopul optic Neophot-2 ale alamei ( $L_f=100$  m,  $c=5$  mm,  $t=475$  min): a) forța  $F=50$ N, mărire 2,5x; b) forța  $F=50$ N, mărire 12,5x



forței de încărcare. În schimb, la bronz se observă atât smulgeri de material cât și material lipit, laminării, pe întinderi apreciabile (cca. 20÷25%) pe suprafața urmelor de uzură.

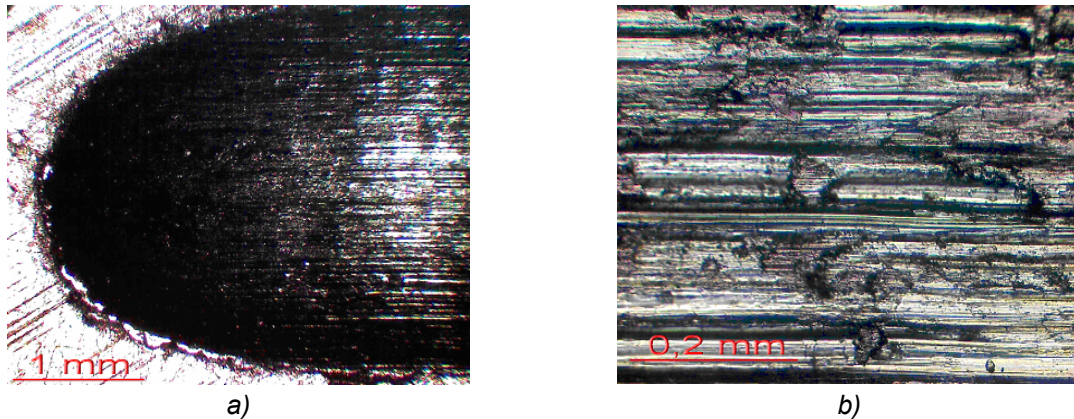


Fig.3.39.

Imagini ale urmelor de uzură, obținute la microscopul optic Neophot-2, ale bronzului, ( $L_f=100$  m,  $c=5$  mm,  $t=475$  min): a) forța  $F=50$ N, mărire 2,5x; b) forța  $F=50$ N, mărire 12,5x

Investigațiile microscopice cu scanare electronică (SEM) a urmelor de uzură ale materialelor studiate oferă imagini mai clare, mai sugestive privind procesele tribologice ce au avut loc la suprafața de contact a celor două elemente care au format cupla tribologică testată. Imaginile SEM de pe suprafața urmelor de uzură ale materialelor compozite au fost obținute la o tensiune de accelerare a fascicului de electroni de 15 kV, iar pentru materialele metalice la tensiunea de accelerare de 20 kV. În fig. 3.40÷3.47 sunt prezentate imagini tipice ale urmelor de uzură achiziționate cu microscopul electronic Quanta 200.

Imaginile SEM pentru compozitul SAC, (fig. 3.40) evidențiază fisuri la limita grăunților de material perpendiculare pe direcția mișcării relative dintre triboelementele modelului testat.

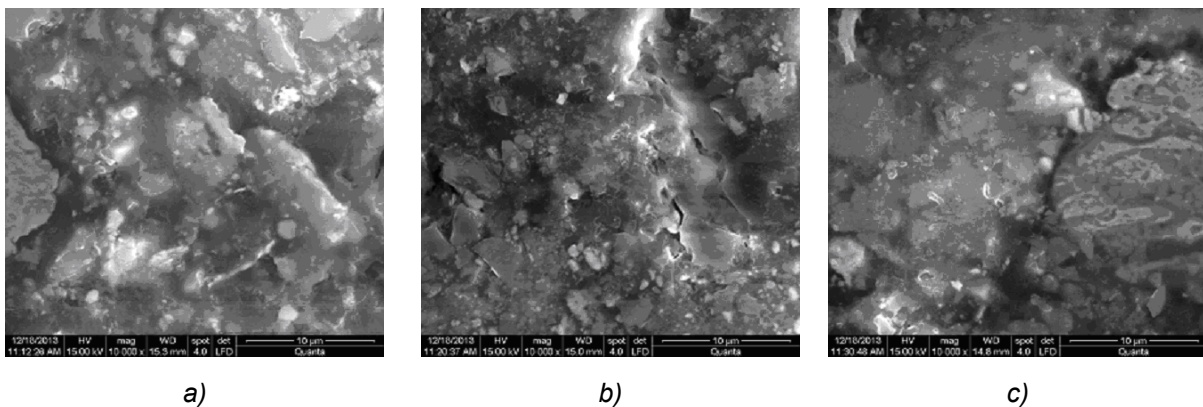


Fig.3.40.

Imagini SEM ale urmelor de uzură pentru compozitul SAC obținute la microscopul electronic Quanta 200, mărire 10000x; ( $L_f=100$  m,  $c=5$  mm,  $t=475$  min): a) forța  $F=30$ N; b) forța  $F=40$ N, c) forța  $F=50$ N.

Imaginile SEM, scara de mărire 10000x, din fig. 3.43 ale compozitului SBC evidențiază aceleași aspecte semnalate și la compozitul SAC: fisuri unidirecționale, perpendiculare pe direcția mișcării relative dintre cele două elemente testate.

În cazul compozitului SMC se observă (fig. 3.44), la mărimi de 10000x, aceleași aspecte ale suprafeței urmelor de uzură ca și la celelalte materiale compozite: fisuri la limita aglomerărilor de particule sau la interfața particule mari-matrice, perpendiculare pe direcția mișcării. Imaginile din fig. 3.44 b, c arată particule de ranforsant neacoperite complet de matricea epoxidică.

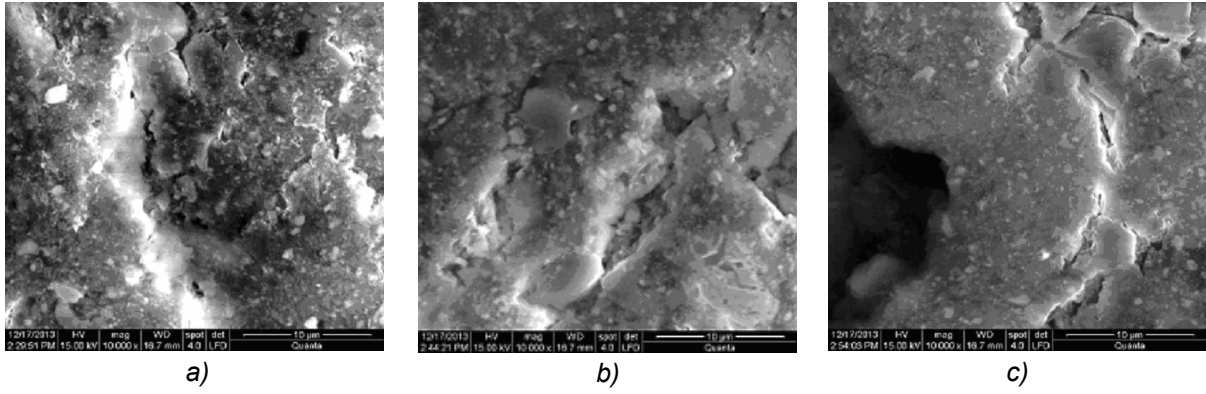


Fig.3.43.

Imagini SEM ale urmelor de uzură ale compozitului SBC obținute la microscopul electronic Quanta 200, mărire 10000x; ( $L_f=100$  m,  $c=5$  mm,  $t=475$  min): a) forța  $F=30$ N; b) forța  $F=40$ N, c) forța  $F=50$

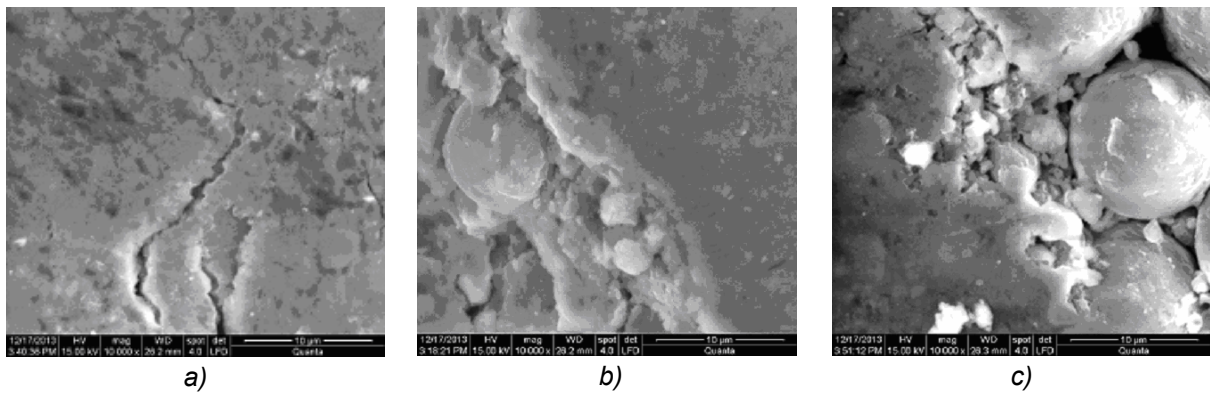


Fig.3.44.

Imagini SEM ale urmelor de uzură ale compozitului SMC, obținute la microscopul electronic Quanta 200, mărire 10000x; ( $L_f=100$  m,  $c=5$  mm,  $t=475$  min): a) forța  $F=20$ N; b) forța  $F=30$ N; c) forța  $F=50$ N

Materialele metalice prezintă aspecte comune ale suprafeței urmelor de frecare (fig. 3.46 și 3.47). Sunt evidente urmele uzurii de abraziune orientate în sensul mișcării. De asemenea, se observă smulgeri de material mai evidente în cazul alamei. Se mai constată exfolieri de material care, o parte din ele, sunt laminare pe suprafața uzată. Ponderea acestor exfolieri este mai mare la bronz, la forțele de 40 și 50 N. Aceste smulgeri de material combinate cu laminările pe suprafața uzată sunt aspecte specifice uzurii de adeziune.

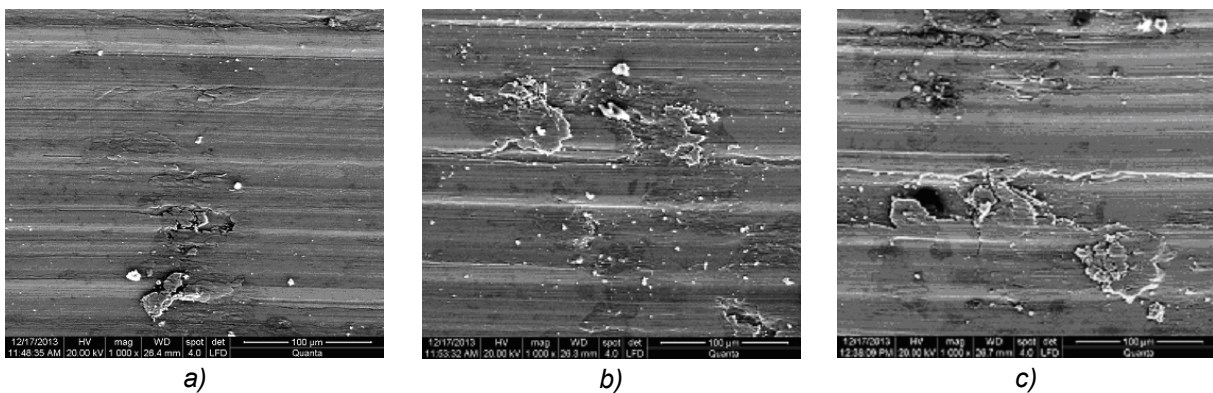


Fig.3.46.

Imagini SEM ale urmelor de uzură ale alamei, obținute la microscopul electronic Quanta 200, mărire 1000x; ( $L_f=100$  m,  $c=5$  mm,  $t=475$  min): a) forța  $F=30$ N; b) forța  $F=40$ N, c) forța  $F=50$ N

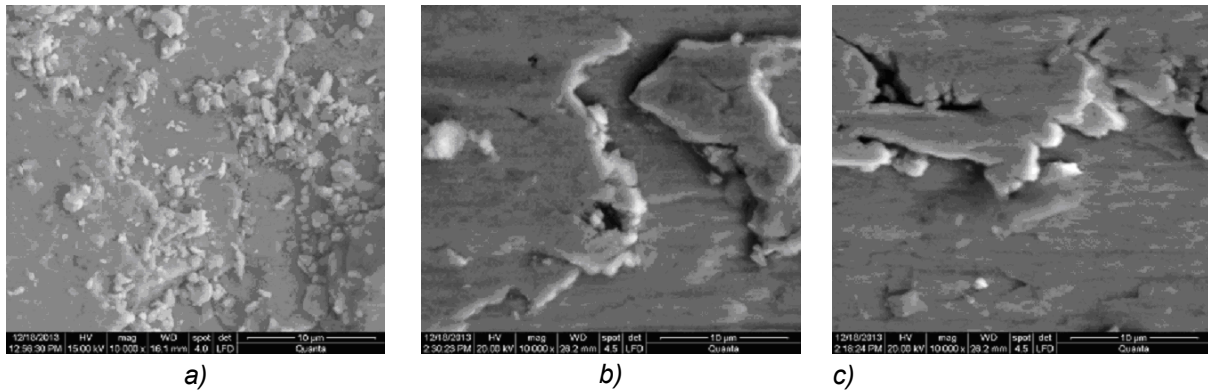


Fig.3.47

Imagini SEM ale urmelor de uzură ale bronzului, obținute la microscopul electronic Quanta 200, mărire 10000x; ( $L_f=100$  m,  $c=5$  mm,  $t=475$  min): a) forța  $F=20$ N; b) forța  $F=40$ N, c) forța  $F=50$ N

### 3.5. Clasificarea materialelor testate

O clasificare generală, unică, valabilă pentru toate criteriile, nu este posibilă. În cazul materialelor studiate, se fac clasificări după coeficientul de frecare mediu pentru fiecare din cele două configurații de testare folosite, în funcție de forțele de încărcare și după parametrii de uzură volumici tot în funcție de forțele de încărcare.

La testul de frecare uscată în configurația bilă-pe-plan, pe distanța de 100 m, se observă influența forței de încărcare asupra coeficientului de frecare mediu calculat pe ultimii 25 m (tab. 3.2). Pentru forța de încărcare de 20 și 30 N, din punct de vedere al coeficientului de frecare mediu, o clasificare a materialelor studiate este (începând cu cel mai mic): compozitul pentru alamă, alama, compozitul *moglice*, bronzul și compozitul pentru bronz. Pentru celelalte două forțe de încărcare, 40 și 50 N, față de clasificarea precedentă, se produce o rocadă între bronz și compozitul pentru bronz. Dar, având în vedere diferențele foarte mici ale coeficientului de frecare mediu pentru bronz și compozitul pentru bronz, la toate cele patru forțe de încărcare, se poate accepta o clasificare unică pentru toate forțele care ar fi: 1. compozitul pentru alamă; 2. alama; 3. compozitul *moglice*; 4-5. bronzul și compozitul pentru bronz.

La testele de frecare știft-pe-disc, fără lubrifiere, clasificarea materialelor este influențată de forța normală de încărcare, fără a se putea stabili o legătură directă în acest sens. Astfel, această clasificare, în ordinea crescătoare a coeficientului de frecare mediu, pentru cele trei forțe de încărcare, este prezentată în tab. 3.4.

Tabelul 3.4

Clasificarea materialelor după coeficientul de frecare în ordine crescătoare, testate uscat în configurația știft-pe-disc.

Forța	Ordinea materialelor				
F=30 N	1. SMC	2. SBC	3-4. SAC și SA		5. SB
F=40 N	1. SMC	2. SA	3. SBC	4. SB	5. SAC
F=60 N	1. SA	2. SB	3. SMC	4. SAC	5. SBC

Din punct de vedere al parametrilor de uzură (volum de material uzat, intensitatea uzurii, coeficient de uzură), în ordinea crescătoare a acestora, clasificarea materialelor, excluzând compozitul pentru bronz, stabilește următoarea ordonare a materialelor: 1. compozitul SAC; 2. compozitul SMC; 3. alama; 4. bronzul.

Compozitul pentru bronz are o variație mai accentuată comparativ cu celelalte materiale. Pentru forța de 30 N, valorile parametrilor de uzură situează acest material pe



locul al treilea, între compozitul SMC și alamă. Pentru forța de 40 N, compozitul SBC ocupă locul trei împreună cu alama, iar, la valoarea forței normale de 60 N, ajunge pe ultimul loc.

### 3.6. Concluzii

Din analiza rezultatelor prezentate anterior se desprind următoarele concluzii generale referitoare la testarea tribologică a compozitelor și materialelor metalice:

- A. Coeficientul de frecare pentru programele de testare în configurația bilă-pe-plan:
- rezultatele obținute pentru coeficientul de frecare, prin derularea primului program de testare (paragraf 2.3 tab. 2.6) au fost nerelevante: după frecare pe lungimi de 6÷21 m, coeficientul de frecare nu se stabilizase încă;
  - din cauza celor menționate mai sus, a fost derulat al doilea program de teste în conformitate (conform ASTM G133-05), când lungimea de testare a fost de 100 m;
  - materialele compozite prezintă o stabilitate mai bună a coeficientului de frecare datorită stratului de polimer transferat în zona de contact;
  - variația coeficientului de frecare este foarte puțin influențată de forța de încărcare, excepție făcând compozitul pentru alamă și compozitul pentru bronz;
  - la compozitul pentru alamă se observă o ușoară dispersare a valorilor coeficientului de frecare pentru cele patru forțe către sfârșitul lungimii de testare;
  - același material (SAC) a avut cel mai bun coeficient de frecare mediu dintre toate materialele studiate, pentru toate forțele de testare;
  - coeficientul mediu de frecare ( $\mu_{med}$ ), calculat pentru ultimii 25 m de testare, (fig. 3.6-b ÷ fig. 3.10-b) și tabelul 3.2) prezintă variații foarte mici la modificarea forței de încărcare;
  - compozitul SBC, are un coeficient de frecare mediu foarte apropiat de cel al bronzului; pentru valori ale forței de încărcare de 20 și 30N, coeficientul de frecare mediu al compozitului SBC este mai mic decât cel al bronzului; pentru forțele de 40 și 50N relația dintre coeficienții de frecare medii ai celor două materiale este invers;
  - compozitul SMC ocupă locul trei la toate cele patru forțe de testare, înaintea compozitului SBC și a bronzului și poate fi un înlocuitor al celor două materiale în aplicațiile ingineresti.
- B. Coeficientul de frecare pentru configurația știft-pe-disc:
- coeficientul de frecare mediu, calculat pe ultimele 300s (~245m) de testare, prezintă diferențe apreciabile în funcție de forța de încărcare;
  - la materialele metalice, acesta descrește odată cu creșterea forței de încărcare;
  - la materialele compozite, SAC și SBC, coeficientul de frecare mediu are valoarea cea mai mare pentru forța  $F=40N$ ;
  - coeficientul de frecare mediu crește odată cu forța normală la compozitul SMC;
- C. Parametrii de uzură în configurația bilă-pe-plan:
- uzura liniară, pentru toate materialele studiate, prezintă creșteri odată cu creșterea forței normale de încărcare;
  - compozitul pentru alamă are cele mai mici valori ale uzurii liniare dintre toate materialele, urmat de compozitul *moglice*;
  - pentru alamă și bronz, uzura liniară crește liniar cu lungimea de frecare; la compozite, după o creștere rapidă în etapa de început, urmează o atenuare a vitezei de creștere a uzurii liniare;
  - parametrii de uzură volumici (volumul de material uzat, intensitate uzurii, coeficientul de uzură) au creșteri liniare, cu aceeași viteză, odată cu creșterea forței de încărcare pentru toate materialele cu excepția compozitului pentru bronz. La acest material viteza de creștere a parametrilor de uzură este mai mare;

- e) din punct de vedere al parametrilor de uzură, compozitul pentru alamă este mai bun decât alama, iar compozitul pentru bronz este mai bun decât bronzul pentru forțe de încărcare de până la aprox. 43 N; compozitul *moglice* are valori ale parametrilor de uzură mai mici decât alama și bronzul ceea ce îl poate face un bun înlocuitor al acestor metale;

D. Analiza profilometrică are în vedere mărimea unor parametri profilometrici precum lățimea și adâncimea urmelor de uzură în secțiune transversală. Din analiza acestor profilograme reiese că:

- a) parametrii de profilometrie 2D, lățimea și adâncimea urmelor de uzură, pentru toate materialele cresc odată cu creșterea forței;
- b) compozitul pentru alamă are valorile parametrilor profilometrici cele mai mici;
- c) compozitul pentru bronz parametrii profilometrici mai mici decât ai bronzului, la forțe de 20 și 30 N; pentru forțele de 40 și 50 N bronzul are valori mai mici;
- d) imaginile de profilometrie 3D achiziționate cu modulul de profilometrie al tribometrului UMT-2 indică urme de uzură prin abraziune (brăzdări, șanțuri, rizuri, protuberanțe neregulate) la materialele metalice și uzură preponderent adezivă pentru compozite (smulgeri de material);

E. Analiza morfologică.

Imaginile obținute prin microscopie electronică sau optică, la diferite mărimi, pun în evidență aspecte neobservate la profilometria 3D realizată cu tribometrul UMT-2. Astfel:

- a) se constată prezența uzurii de abraziune la toate materialele, mai evidentă la metale și, în special, la bronz;
- b) se observă brăzdări, șanțuri, în special, pe particulele de ranforsant mai dure, fisuri perpendiculare pe direcția mișcării la limita aglomerărilor de particule sau la interfața matrice-ranforsant, care s-au propagat în adâncime ca urmare a uzurii de oboseală;
- c) s-au mai observat, pe suprafața urmelor uzate ale tuturor materialelor, manifestări ale uzurii de adeziune: smulgeri și lipiri (laminări) de material, goluri cauzate de desprinderile de particule antrenate în timpul mișcării;
- d) la alamă, aceste smulgeri cresc, ca arie, odată cu creșterea forței de încărcare;
- e) la bronz desprinderile și lipirile de material laminat se întind pe suprafețe de aproximativ 20÷25%;

Câteva concluzii generale se pot adăuga la finalul acestui capitol:

1. o clasificare unică a materialelor studiate, după toate criteriile discutate (configurație de testare, coeficient de frecare, parametri de uzură liniară, volumică, etc.), nu este posibilă; clasificările se pot face pentru anumite condiții concrete;
2. compozitul pentru alamă este superior alamei după mai multe criterii (coeficient de frecare, parametri de uzură volumică) în configurația bilă-pe-plan;
3. în aceeași configurație de testare compozitul pentru bronz are un comportament tribologic apropiat de cel al bronzului și poate fi un candidat corespunzător pentru înlocuirea acestuia în aplicațiile ingineresti;
4. compozitul *moglice* are un coeficient de frecare mediu mai bun decât al bronzului în testarea bilă-pe-plan;
5. în configurația știft-pe-disc, compozitul *moglice* are un coeficient de frecare mediu foarte mic, unde doar pentru forța de 60 N este depășit de alamă;
6. aceste clasificări ale materialelor, efectuate în urma unor testări, au rolul de-a restrânge domeniul de selecție în alegerea celor mai corespunzătoare materiale avute în vedere pentru o aplicație reală.

## Capitolul 4

### COMPORTAREA TRIBOLOGICĂ LA ZGÂRIERE

#### 4.1. Modelul teoretic al contactului con-plan la zgâriere

Testul de zgâriere este unul dintre multele teste micromecanice de caracterizare a suprafețelor materialelor.

Testarea prin zgâriere este un proces prin care un penetrator (indentor) pătrunde într-un material sub acțiunea unei forțe de apăsare, apoi se deplasează liniar pe o direcție axială în diferite condiții (ex.: forța și adâncime constante sau adâncimea crescătoare și forță variabilă).

Pentru studierea proceselor de uzură prin zgâriere au fost propuse diverse modele teoretice. Stachowiak G.W., în [4], analizează unele dintre aceste modele ale uzurii abrazive prin zgâriere. Într-un astfel de model, preluat din [145], particula de uzură este asimilată de un con care pătrunde perpendicular pe suprafața materialului și apoi se deplasează pe o anumită distanță, o singură dată (fig. 4.1). În această modelare se admite ipoteza că tot materialul îndepărtat de con se pierde ca material uzat.

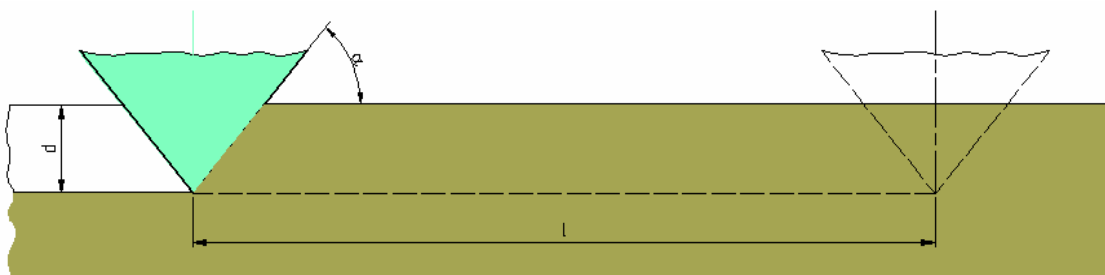


Fig. 4.1.  
Modelul de uzură abrazivă cu o singură trecere [4]

În acest model, forța necesară pentru penetrarea indentorului este:

$$F_i = 0,5\pi(d \cdot \text{ctg} \alpha)^2 H \quad (4.1)$$

unde:

$F_i$  – forța de necesară pentru deplasarea indentorului, [N];

$d$  – adâncimea de penetrare a indentorului, [m];

$\alpha$  – unghiul de atac al indentorului;

$H$  – rezistența la curgere a materialului, [Pa].

Volumul de material îndepărtat prin zgâriere, simplificat, se calculează cu relația:

$$V_i = l \cdot d \cdot \text{ctg} \alpha \quad (4.2)$$

unde:

$V_i$  – volumul de material îndepărtat de con pe lungimea  $l$ , [m<sup>3</sup>];

$L$  - lungimea de deplasare a conului, [m].

Un alt model pentru zgâriere, mai elaborat, prezentat în [4] este cel dezvoltat de Zum Gahr K-H. în [147]. În această modelare, materialul nu dispare în totalitate ca material uzat. În cazul materialelor ductile, o parte din materialul degajat este răsfrânt de o parte și de alta a zgârieturii, ca o bordură (fig. 4.2).

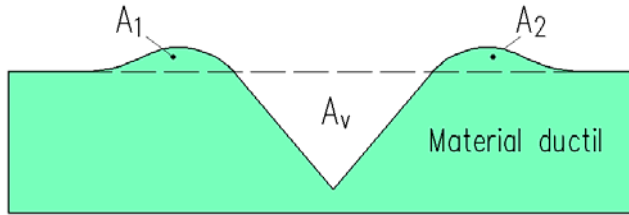


Fig. 4.2.  
Modelul de uzură abrazivă cu o singură trecere pentru materialele ductile [4]

Se introduce un parametru nou, factorul de abrazivitate ( $f_{ab}$ ), care caracterizează materialul îndepărtat de pe suprafață prin zgâriere [4]:

$$f_{ab} = 1 - \frac{A_1 + A_2}{A_v} \quad (4.5)$$

în care, într-o secțiune transversală pe urma de zgâriere,:

$A_1, A_2$  – ariile corespunzătoare materialului dispus la marginea șanțului de zgâriere;

$A_v$  – aria canalului urmei de uzură.

Valorile lui  $f_{ab}$  pot fi:

$f_{ab}=1$ , pentru microtăieri ideale;

$f_{ab}=0$ , pentru brăzdări ideale, și

$f_{ab}>1$ , pentru microfisuri.

Rata de uzură liniară sau adâncimea de uzură raportată la distanța de alunecare  $l$ , pentru materialele ductile, este [4]:

$$\Delta V_{d,duct} = \frac{\Delta V}{l \cdot A} = f_{ab} \frac{A_v}{A} \quad (4.6)$$

unde:

$\Delta V_d$  – rata de uzură liniară sau adâncimea de uzură, raportată la distanța de zgâriere,  $l$ ;

$\Delta V$  – este volumul de material pierdut prin abraziune, la zgâriere;

$A$  – aria amprentei conului (intersecția dintre con și plan), [m<sup>2</sup>].

Modelarea materialelor fragile este făcută după schema din fig. 4.3.

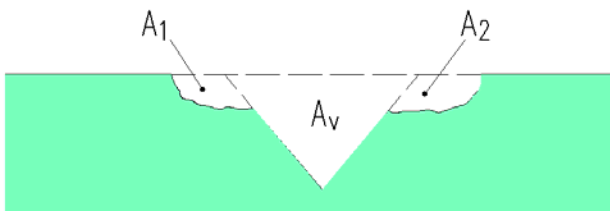


Fig. 4.3.  
Modelul de uzură abrazivă cu o singură trecere pentru materialele fragile [4]

Și în acest caz se calculează un factor de abrazivitate, dar cu relația [147 citat în 4]:

$$f_{ab} = 1 + \frac{|A_1 + A_2|}{A_v} \quad (4.7)$$

În urma examinării urmelor de zgâriere, ale materialelor studiate, cu rugozimetrul Surtronic 3+, a rezultat că toate sunt ductile, profilogramele arătând ca modelul din fig. 4.2.

Prin penetrarea unei suprafețe plane de un indentor conic, cu geometria cunoscută (unghi la vârf și raza vârfului), se crează un crater pe ale cărui margini se revarsă materialul evacuat (fig. 4.4-a). Prin deplasarea indentorului pe o direcție liniară ( $y$ ) cu o lungime dată ( $L$ ) se obține un canal (fig. 4.4-b) cu marginile bordurate, a cărui secțiune este prezentată în

fig. 4.4-a. Zum Gahr K-H. dezvoltă un model teoretic în lucrarea [147], model specific materialelor ductile.

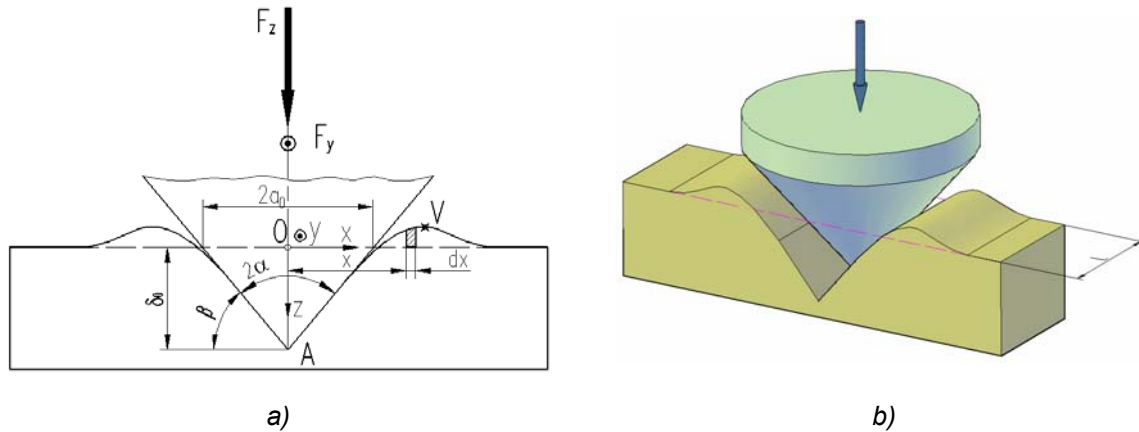


Fig. 4.4.

Modelul teoretic al contactului con-plan la zgâriere, pentru materialele ductile:  
a) în secțiune; b) în spațiu

#### 4.2. Testarea la zgâriere

Materialele compozite și materialele metalice au fost testate la zgâriere pe un tribometru UMT-2 [138] prevăzut cu un modul pentru efectuare unor asemenea teste, din dotarea Departamentului de Organe de Mașini și Tribologie al Universității Politehnica București. Testele au fost efectuate în conformitate cu recomandările standardului american „ASTME G171-03 - Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus”. Echipamentul utilizat este prezentat în fig. 4.5.

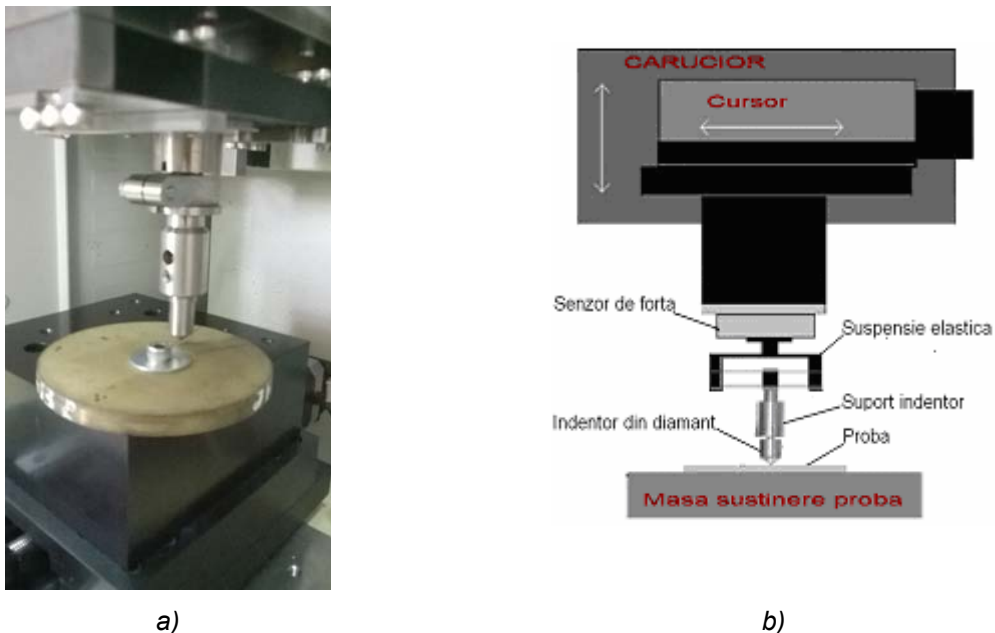


Fig. 4.5.

Echipamentul utilizat pentru testul de zgâriere: a) tribometru UMT-2 cu modulul de zgâriere; b) schema modului pentru zgâriere [138]



#### 4.2.1. Parametrii de testare

Testele de zgâriere au fost efectuate la temperatura camerei și condiții de umiditate relativă de 50-60%. Înainte de testare, probele au fost curățate cu acetonă. Parametrii de testare au fost: forța de penetrare de 10 N, 30 N și 50 N; lungimea de zgâriere: 5 mm și durata zgârierii: 20s. Achiziția datelor s-a făcut cu intervalul de eșantionare de 0,001 s, respectiv, de 0,25  $\mu\text{m}$ . Indentorul are un vârf conic din diamant, cu unghiul la vârf de  $2\alpha=120^\circ$  și o rază de 35  $\mu\text{m}$ .

Parametrii monitorizați de soft-ul tribometrului au fost: coeficientul de frecare, forța de frecare și forța de penetrare a indentorului, toate în funcție de timp, iar Urmele de zgâriere au fost studiate cu profilometrul digital Surtronic 3+ și au fost prelucrate cu soft-ul Talyprof.

#### 4.2.2. Coeficientul de frecare la zgâriere

Diagramele pentru coeficientul de frecare și forța de frecare sunt prezentate în fig. 4.6÷4.10.

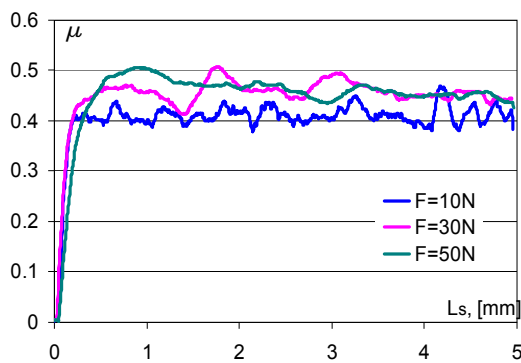


Fig. 4.6

Compozit pentru alamă, testare prin zgâriere: a) diagrama de variație a coeficientului de frecare; b) diagrama de variație a forței de frecare

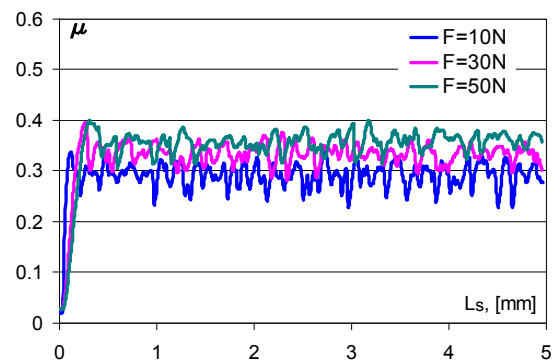


Fig. 4.7

Alamă, testare prin zgâriere: a) diagrama de variație a coeficientului de frecare; b) diagrama de variație a forței de frecare

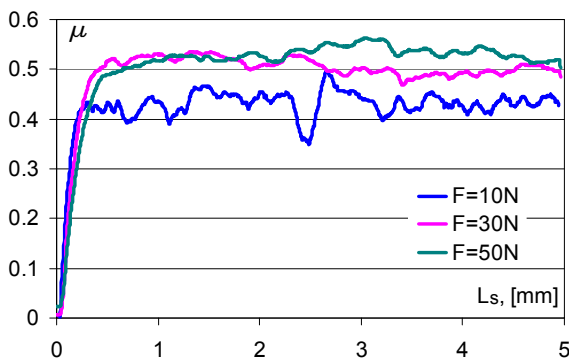


Fig. 4.8

Compozit pentru bronz, testare prin zgâriere: a) diagrama de variație a coeficientului de frecare; b) diagrama de variație a forței de frecare

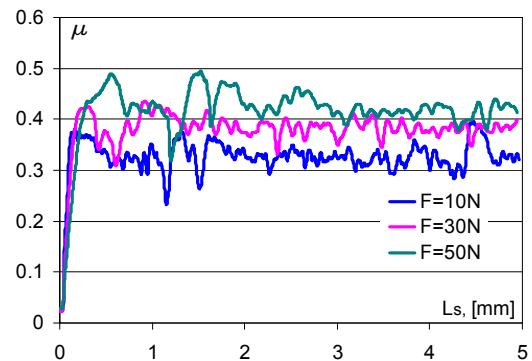


Fig. 4.9

Bronz, testare prin zgâriere: a) diagrama de variație a coeficientului de frecare; b) diagrama de variație a forței de frecare

Studiind diagramele de variație ale coeficientului de frecare și forței de frecare din fig. 4.6+4.10 se observă următoarele aspecte:

- oscilații locale ale coeficientului de frecare și forței de frecare cu amplitudinea mai mare la materialele metalice și amplitudine mică la materialele compozite;
- de asemenea, oscilații locale mai mari apar odată cu creșterea forței de penetrare;
- apariția salturilor ar putea fi cauzată de apariția în calea indentorului a unor particule sau grăunți cristalini de dimensiuni mai mari;

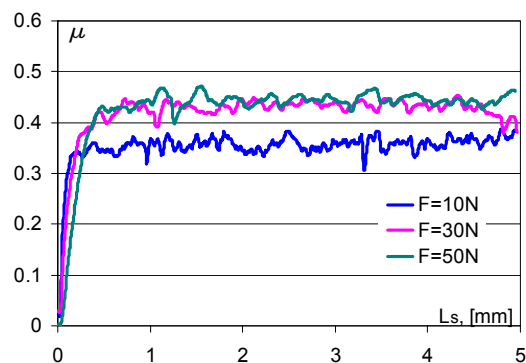


Fig. 4.10

Compozitul moglice, testare prin zgâriere: a) diagrama de variație a coeficientului de frecare; b) diagrama de variație a forței de frecare

Coeficientul de frecare mediu, la testarea prin zgâriere, fost calculat ca medie a tuturor valorilor achiziționate pe toată lungimea de zgâriere, cu pasul de 0,25 μm. Valorile acestuia, pentru toate forțele de penetrare și pentru toate cele cinci materiale sunt prezentate, în tabelul 4.1 și în fig. 4.10 și 4.11.

Tabelul 4.1  
Coeficientul mediu la frecare la testarea prin zgâriere, calculat pentru toată lungimea de zgâriere de 5 mm

Nr.crt.	Materialul	F=10N	F=30N	F=50N
1.	Compozit pentru alamă, cod SAC	0,403	0,448	0,448
2.	Alamă, cod SA	0,289	0,328	0,348
3.	Compozit pentru bronz, cod SBC	0,422	0,490	0,507
4.	Bronz, cod SB	0,325	0,379	0,415
5.	Moglice, cod SMC	0,352	0,418	0,425

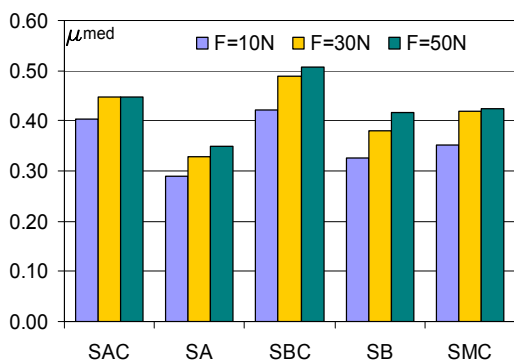


Fig. 4.11

Coeficientul de frecare mediu, la testare prin zgâriere, în funcție de material pentru cele trei forțe de încărcare

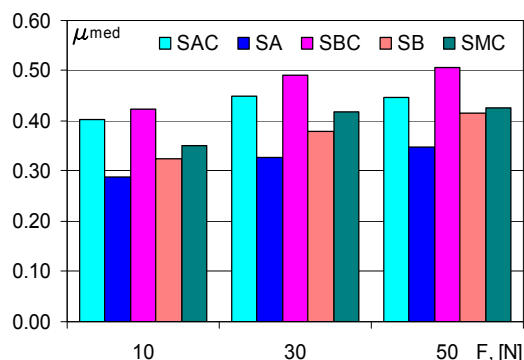


Fig. 4.12

Coeficientul de frecare mediu, la testare prin zgâriere, în funcție de forța de încărcare pentru toate materialele

Din diagramele din fig. 4.11 și 4.12 se constată:

- la toate materialele, excepție făcând compozitul cod SAC, valorile coeficientului de frecare cât și ale forței de frecare prezintă creșteri odată cu creșterea forței de penetrare;
- la compozitul SAC și SMC, valorile coeficientului de frecare și ale forței de frecare, pentru forța de penetrare de 30 N și 50 N, sunt foarte apropiate;

- clasificările materialelor studiate în funcție de valorile coeficientului de frecare și a forței de frecare, pentru fiecare forță de penetrare, sunt identice: 1. alamă; 2. bronz; 3. compozitul moglice; 4. compozitul pentru alamă; 5. compozitul pentru bronz.

#### 4.2.3. Studiul profilometric

Urmele de la testarea prin zgâriere au fost studiate profilometric cu profilometrul digital Surtronic 3+ și softul Talyprof. Au fost efectuate câte trei profilograme 2D ale secțiunilor transversale ale fiecărei urme: la jumătatea lungimii urmei și la cca. 2 mm de o parte și de alta a acesteia. Datele au fost achiziționate cu pasul de 0,5  $\mu\text{m}$  pe o lungime de scanare de 2,5 mm. Diagramele obținute prin prelucrarea datelor achiziționate sunt prezentate în fig. 4.13÷4.15.

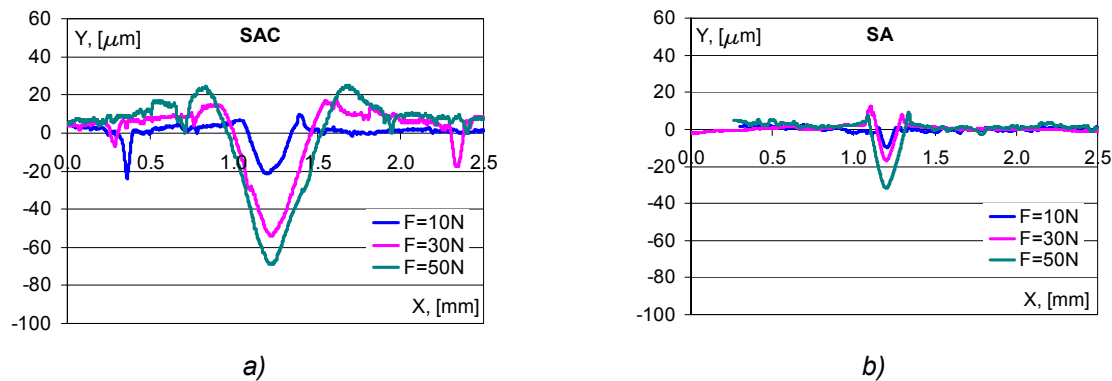


Fig. 4.13

Profilograme 2D, testare prin zgâriere: a) compozitul pentru alamă; b) alamă

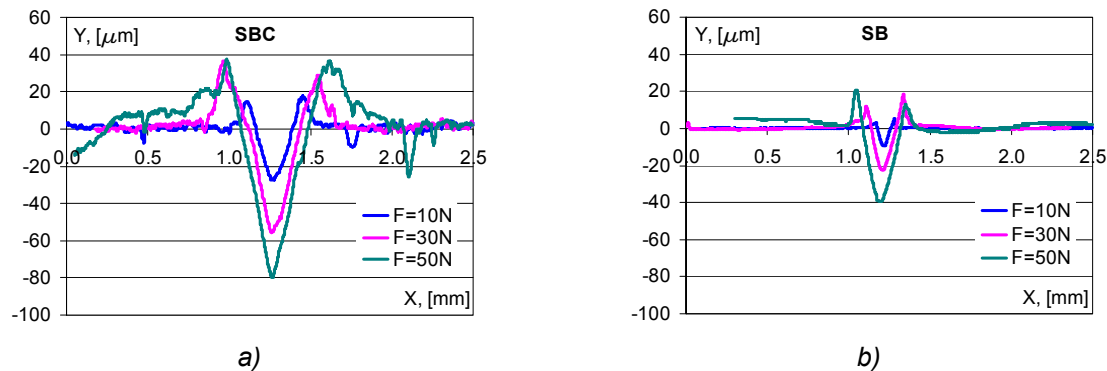


Fig. 4.14

Profilograme 2D, testare prin zgâriere: a) compozitul pentru bronz; b) bronz

Din profilogramele prezentate în fig. 4.13÷4.15 se observă:

- mărimea profilogramelor (adâncimea maximă și lățimea urmei) crește odată cu creșterea forței;
- toate materialele prezintă bordurări de material la marginea canalului creat de indentor, ceea ce duce la concluzia că materialele sunt ductile;
- materialul bordurat nu este simetric față de axa secțiunii craterului;
- o măsură a volumului de material comasat la marginea urmei de zgâriere sub forma unor borduri se face prin factorul de abrazivitate (4.5).

Factorul de abrazivitate a fost calculat în urma măsurătorilor efectuate zgârierilor cu profilometrul Surtronic 3+.

Au fost efectuate câte trei profilograme pentru fiecare urmă de zgâriere și la fiecare profilogramă s-au măsurat: aria craterului ( $A_v$ ) și cele două arii corespunzătoare materialului bordurat ( $A_1$  și  $A_2$ ). Apoi, s-a calculat valoarea medii a celor trei arii și cu această valoare a fost calculat factorul de abrazivitate, tab. 4.2.

Valori ale factorului de abrazivitate, cuprinse între 0 și 1, indică o deformare a materialului de către indenter, dar și o uzură prin abraziune. Valori apropiate de 0 indică o deformare a materialului cu formare de borduri, în timp ce valori apropiate de 1 sugerează pierderi de material prin abraziune.

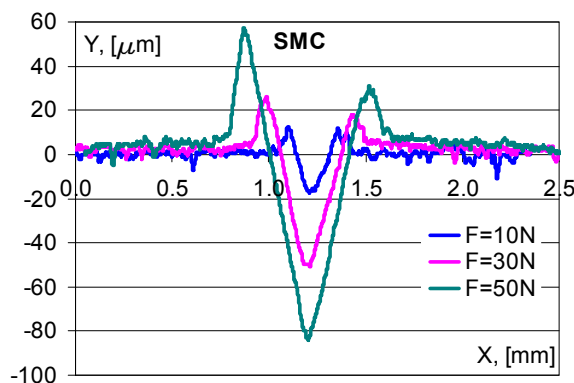


Fig. 4.15  
Profilograme 2D, testare prin zgâriere pentru compozitul SMC

Tabelul 4.2  
Factorul de abrazivitate la testarea prin zgâriere

	Compozit pentru alamă	Alamă	Compozit pentru bronz	Bronz	Compozitul moglice
F=10 N	0,522	0,810	0,428	0,626	0,430
F=30 N	0,547	0,270	0,215	0,416	0,322
F=50 N	0,488	0,592	0,205	0,749	0,273

#### 4.2.4. Adâncimea medie de penetrare a urmelor de zgâriere

Adâncimea medie de penetrare este un parametru sugestiv pentru caracterizarea materialelor la testele de zgâriere. Acest parametru ( $Z_{med}$ ) a fost calculat pe baza valorilor achiziționate la efectuarea testelor de zgâriere și au fost luate în considerare toate valorile obținute pe lungimea de zgâriere de 5 mm. Se calculează cu relația:

$$Z_{med} = \frac{\sum_{i=1}^N Z_i}{N} \quad (4.15)$$

unde:

$Z_i$  – adâncimea de penetrare într-un punct curent  $i$ ;

$N$  – numărul măsurătorilor dintr-o urmă de zgâriere.

Rezultatele calculelor pentru adâncimea medie, pentru toate materialele și toate cele trei forțe de penetrare, sunt înregistrate în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3  
Adâncimea medie de penetrare la testele de zgâriere, [mm]

	Compozit pentru alamă	Alamă	Compozit pentru bronz	Bronz	Compozitul moglice
F=10 N	0,1638	0,1218	0,1556	0,1209	0,1475
F=30 N	0,4689	0,3546	0,4236	0,3610	0,4179
F=50 N	0,7883	0,5814	0,6770	0,5965	0,6599

Pe baza valorilor din tabelul 4.3 au fost realizate graficele din fig. 4.15÷4.16.

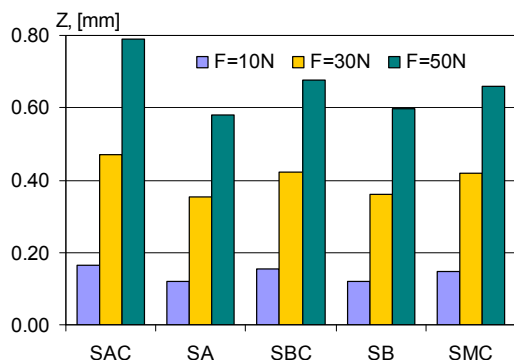


Fig. 4.16

Adâncimea medie de penetrare la testarea prin zgâriere în funcție de material pentru cele trei forțe de încărcare

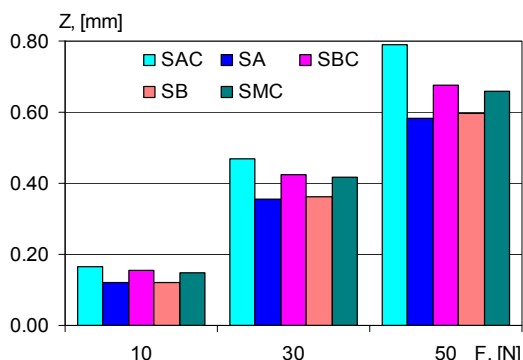


Fig. 4.17

Adâncimea medie de penetrare la testarea prin zgâriere în funcție de forța de încărcare pentru toate materialele

Se constată că materialele metalice, alama și bronzul, au valori foarte apropiate ale adâncimii medii de pătrundere (fig. 4.17). Clasificarea materialelor în ordinea creșterii adâncimii medii de penetrare arată astfel: 1-2) alama și bronzul; 3) compozitul moglice; 4) compozitul pentru bronz; 5) compozitul pentru alamă.

### 4.3. Analiza morfologică

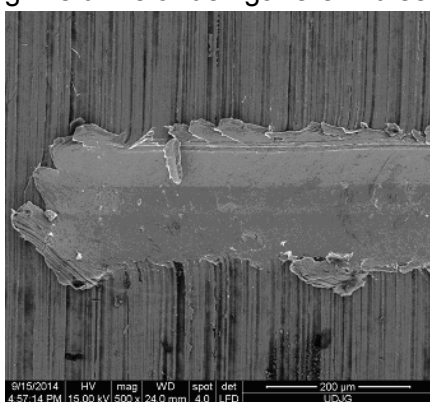
Urmele de zgâriere au fost studiate cu microscopul Quanta 200.

În fig. 4.19+4.22 sunt prezentate din imagini SEM reprezentative pentru toate materialele testate

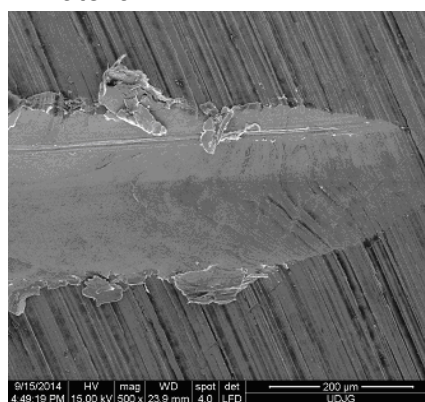
La compozitul SAC, urmele de zgâriere nu sunt atât de evidente ca la celelalte materiale. Acest aspect confirmă caracteristicile tribologice bune ale compozitului la frecare când s-au constatat valori mici ale coeficientului de frecare mediu în configurația bilă-pe-plan precum și știft-pe-plan.

La alamă (fig. 4.19) se observă materialul rășfrânt la marginea urmei de zgâriere, dar și fisurile în arc de cerc paralele și cu vârful îndreptat în direcția mișcării. La începutul zgârierii, apar deformări plastice ale materialului care curge creând un aspect de „solzi de pește”.

La compozitul SBC (fig. 4.20) o parte din materialul îndepărtat de indenter este depus la marginile urmelor de zgâriere. Nu se observă fisuri în material.



a)



b)

Fig. 4.19

Imagine SEM ale urmelor de zgâriere ale alamei pentru forța de penetrare de: a) 30 N; b) 50 N



Urmele de zgâriere de la bronz (fig. 4.21) prezintă fisuri la limita aglomerărilor cristaline. Depunerile de material pe marginile urmei sunt mai mari și mai compacte decât cele de la alamă.

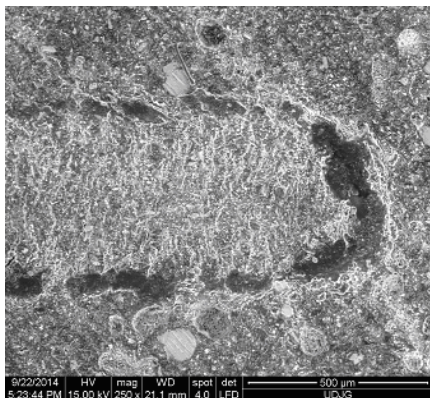


Fig. 4.20

Imagine SEM a urmei de zgâriere a compozitului SBC pentru forța de penetrare de 30 N, mărire 250x

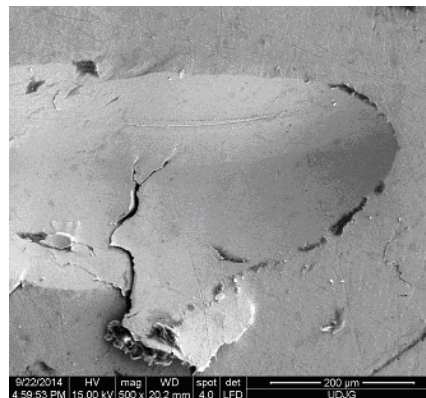
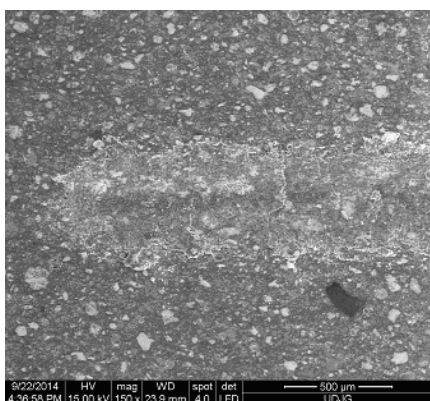


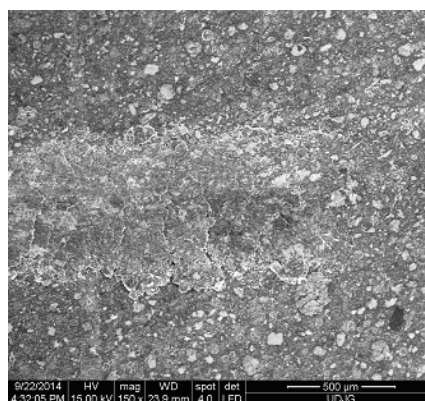
Fig. 4.21

Imagine SEM a urmei de zgâriere la bronz pentru forța de penetrare de 50 N, mărire 500x

La compozitul SMC (fig. 4.22), urmele de uzură prezintă material de depunere pe marginea lor și fisuri mici, paralele între ele și perpendiculare pe direcția zgârierii.



a)



b)

Fig. 4.22

Imagini SEM ale urmelor de zgâriere a compozitului SMC pentru forța de penetrare de: a) 30 N; b) 50 N

#### 4.4. Concluzii după testarea prin zgâriere

Testele de zgâriere fac parte din categoria testelor de caracterizare a materialelor. După efectuarea testelor de zgâriere pe materialele metalice, alamă și bronz, și compozitele polimerice ranforsate cu particule, se desprind următoarele concluzii:

- coeficientul de frecare prezintă oscilații locale, întocmai ca și forța de frecare; amplitudinea acestor oscilații locale sunt mai mari la materialele metalice;
- coeficientul de frecare mediu crește odată cu creșterea forței de penetrare pentru toate materialele, excepție făcând compozitul pentru alamă și compozitul moglice, la care valorile coeficientului de frecare mediu corespundător forțelor de 30 N și 50 N sunt aproximativ egale;
- din analiza profilometrică rezultă că toate materialele testate la zgâriere, pentru toate forțele de penetrare, prezintă bordurări de material pe marginile urmei de zgâriere ceea ce duce la concluzia că materialele sunt ductile; de asemenea, se constată că profilogramele nu sunt întotdeauna simetrice față de axă;

- factorul de abrazivitate,  $f_{ab}$ , are valori cuprinse între 0 și 1, ceea ce înseamnă că prin zgâriere o parte din materialul din craterul urmei de zgâriere este deformat și depus pe margini, iar altă parte este îndepărtat prin abraziune;
- adâncimea medie de zgâriere este proporțională cu forța de penetrare;
- imaginile obținute prin microscopie electronică evidențiază materialul depus sub formă de borduri la marginea urmelor de zgâriere;
- la alamă, în etapa de început a zgârierii, se observă curgeri de material cu aspect de „solzi de pește”;
- sunt prezente fisurile în materiale, mai evidente la metale și la forțe mari de 30 și 50 N;
- materialele compozite par a avea o comportare mai bună la zgâriere decât metalele după frecvența redusă a fisurilor.

## Capitolul 5

# MODELAREA PROCESELOR TRIBOLOGICE CU REȚELE NEURONALE

### 5.1. Descrierea unei rețele neuronale

Rețelele neuronale artificiale sunt o componentă a inteligenței artificiale cu aplicabilitate extinsă în foarte multe domenii, în special, acolo unde metodele algoritmice au avut un succes limitat din cauza, fie a numărului mare al mărimilor de intrare, fie a necunoașterii ponderii acestor mărimi în vectorul mărimilor de ieșire, fie chiar a incapacității sistemelor de calcul concepute pe o logică bivalentă.

În aplicațiile tribologice sunt folosite două funcții ale rețelelor neuronale [104, 105]:

- aproximarea continuă a unei funcții multivariabile, utilizată în modelarea proceselor, și
- clasificarea, care este o aproximare discretă a funcției, utilizată pentru recunoașterea condițiilor de operare ale unui sistem tehnic.

O rețea neuronală presupune existența unor elemente, numite neuroni (sau perceptroni), interconectate prin diverse arhitecturi și care comunică între ele transmițându-și informații, semnale. Organizarea neuronilor într-o rețea este, de obicei, de tipul „feed-forward” și este numită Multi Layer Perceptron (MLP). În fig. 5.1 este prezentat un model de organizare structurală a unei rețele neuronale de tipul MLP.

În general, o modelare bazată pe rețele neuronale implică două etape majore:

- învățarea (instruirea) rețelei neuronale, și
- reprezentare cunoașterii însușite de rețea.

Pentru dezvoltarea unui model bazat pe rețele neuronale, Nasir T. [112] identifică etapele care trebuie parcurse pentru aceasta, ilustrate în fig. 5.2.

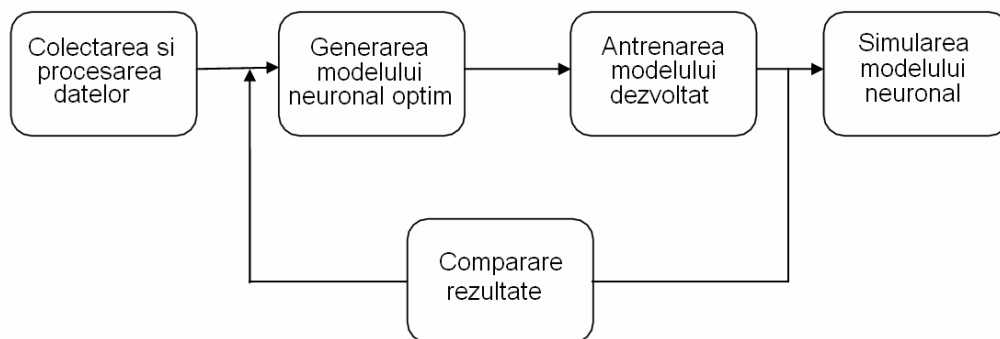


Fig. 5.2

Schemă logică pentru dezvoltarea modelului neuronal, adaptare după [112]

O primă etapă constă în colecționarea datelor ce urmează a fi introduse în modelul neuronal și, dacă este cazul, preprocesarea acestora.

În [103], autorul structurează astfel etapele de realizare a unui model de rețea neuronală:

1. Alegerea unei arhitecturi inițiale compatibilă cu problema de rezolvat și setarea parametrilor de reglare a rețelei;
2. Alegerea algoritmului de instruire a rețelei;
3. Instruirea rețelei pentru rezolvarea problemei;



4. Testarea (validarea) rețelei cu valori din același mediu informațional de antrenare, dar care nu au fost utilizate în acest scop;
  5. Utilizarea efectivă a rețelei neuronale.
- Se menționează aici necesitatea unei preprocesări a datelor de intrare.

## 5.2. Funcționarea unei rețele neuronale de tipul „backpropagation”

Funcționarea unei rețele neuronale de tipul „backpropagation” este sintetizată în [103] unde sunt citate lucrările [150, 151, 152, 153, 154]. Pentru explicarea funcționării instruirii, s-a considerat un model neuronal cu două intrări, două straturi ascunse și o ieșire (fig. 5.3-a). Fiecare neuron este constituit din două unități: o primă unitate în care se însumează semnalele de intrare ajustate cu coeficienții de pondere  $w_i$  și, o a doua unitate, în care se realizează o funcție neliniară  $y=f(e)$  de activare a neuronului (fig. 5.3-b). Semnalele  $e$  și  $y$  sunt: semnal de intrare și, respectiv, de ieșire din neuron.

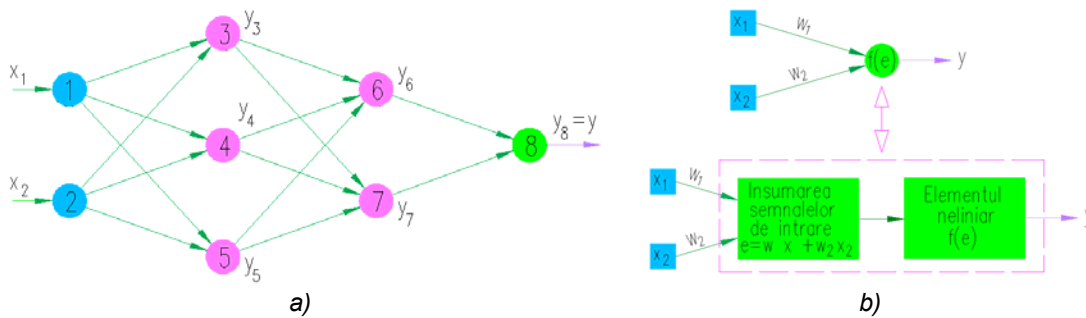


Fig. 5.3

Schemă de funcționare: a) a unui model neuronal; b) a unui neuron, adaptare după [103]

Instruirea rețelei se face cu un set de date cunoscute. În exemplu considerat (fig. 5.3-b), pentru intrările  $x_1$  și  $x_2$ , rezultatul cunoscut este  $z$  și acesta se compară cu rezultatul ieșirii din neuron,  $y$ .

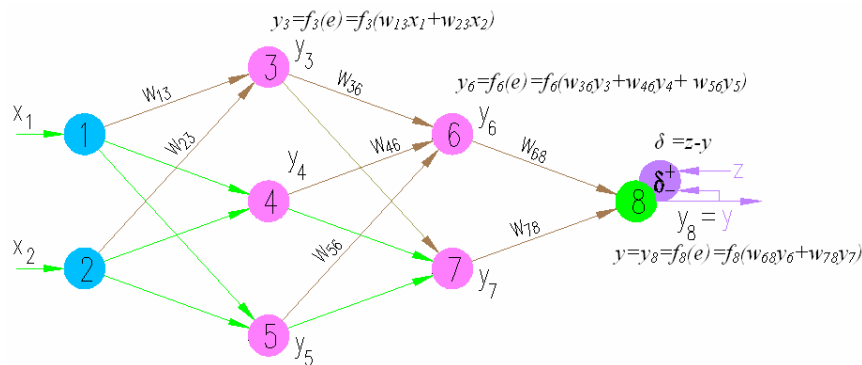


Fig. 5.4

Propagarea directă a semnalului prin rețeaua neuronală

Procesul de instruire al rețelei este un proces iterativ. Se începe instruirea cu valorile inițiale de intrare și se obține valoarea finală  $y$ . Aceasta se compară cu valoarea  $z$  cunoscută. Dacă diferența dintre cele două mărimi este mai mare decât eroarea maximă impusă (numită eroare de semnal), procesul de instruire se reia; altfel, se consideră că rețeaua este instruită și pregătită pentru modelarea fenomenului fizic. În fig. 5.4 este ilustrată propagarea semnalului de la stratul de intrare până la stratul de ieșire când este calculată eroarea de semnal  $\delta$ .

Pe piața din domeniu rețelelor neuronale sunt mai multor soft-uri specializate în modelarea neuronală. În acest studiu a fost utilizat soft-ul EasyNN, o variantă disponibilă gratuit pe piață, cu o interfață grafică prietenoasă și cu facilități de intervenție asupra parametrilor de funcționare.

### 5.3. Utilizarea rețelelor neuronale pentru evaluarea volumului de material uzat

Pentru modelarea neuronală a volumului de material uzat au fost folosite rezultatele testării în configurația bilă-pe-plan, după programul de testare prezentat în paragraful 2.3 a). Valorile de testare pentru cei trei parametri de testare au fost:

F=20, 30, 40 și 50N;

c=2,85; 3,33; 4 și 5 mm;

N=4000, 5000 și 6000 cicluri.

Din combinarea celor trei parametri au rezultat 48 de teste pentru fiecare material.

Volumul de material uzat a fost calculat cu relația (1.5) prin care a fost luat în considerare numai volumul de material de pe zona cilindrică a urmei de uzură, conform [37]. Secțiunile transversale au fost obținute cu profilometrul Surtronic 3+ și prelucrate cu soft-ul Talyprof.

Pentru modelare neuronală a volumului de material uzat s-a folosit o rețea de tipul „backpropagation”, în care mărimile de intrare aparțin mulțimii numerelor reale pozitive: forțele normale, cursa mișcării și numărul de cicluri. Ieșirile sunt reprezentate de valorile volumului de uzură. Înainte de începerea procesului de instruire au fost stabiliți o serie de parametri precum: eroarea țintă de 0,01, momentul și rata de învățare ( $\eta$ ).

Au fost testate mai multe modele neuronale: cu unul, cu două sau cu trei straturi ascunse. În urma instruirii, pentru fiecare model s-a analizat modul de comportare al acestuia: convergență, evoluția erorilor pe parcursul instruirii, importanța factorilor de influență și sensibilitatea factorilor de intrare. Concluzia este că modelul de rețea neuronală cu două straturi ascunse aproximează cel mai bine volumul de material uzat în configurația bilă-pe-plan, în condiții de frecare uscată, pentru toate materialele studiate.

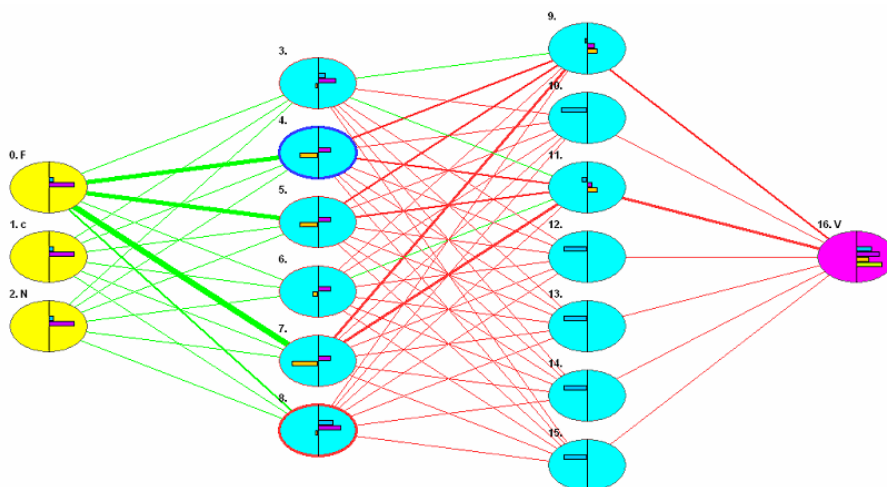


Fig. 5.6

Arhitectura rețelei neuronale artificiale pentru determinarea volumului de uzură al compozitul pentru alamă

În fig. 5.6 este prezentată arhitectura rețelei neuronale a compozitului pentru alamă, pentru modelarea volumului de material uzat în configurația bilă-pe-plan, în mișcare rectilinie alternativă. Cu culoarea galbenă sunt reprezentate mărimile de intrare, cu roz cele de ieșire și cu bleu neuronii din straturile ascunse.

Rețeaua formată are structura [3-6-7-1], cu un strat de intrare care conține trei parametri, două straturi ascunse cu 6 și, respectiv, 7 neuroni; stratul de ieșire are un singur neuron: volumul de material uzat.

Cu eroarea țintă impusă, procesul de instruire a rețelei s-a încheiat după 211 iterații. În fig. 5.7 este prezentată evoluția erorii în timpul instruirii.

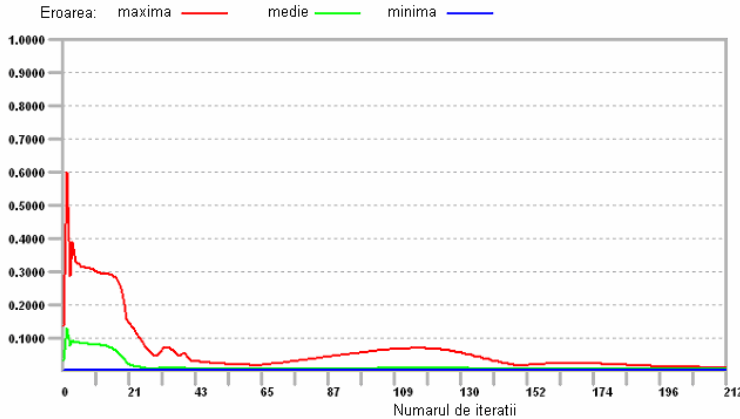


Fig. 5.7  
Evoluția erorii de antrenare în timpul instruirii rețelei neuronale a compozitului pentru alamă

Programul EasyNN oferă doi indicatori de apreciere a factorilor de intrare asupra rezultatului final. Un prim indicator, importanța relativă a factorilor de intrare, se realizează prin însumarea ponderilor ( $w_{ij}$ ) ce pleacă din neuronii de intrare în primul strat ascuns. Astfel, mărimea de intrare cu suma ponderilor cea mai mare este cea cu influența cea mai mare asupra ieșirilor. În fig. 5.8 este arătată importanța mărimilor de intrare asupra mărimii de ieșire a materialului compozit pentru alamă.

Column	Input Name	Importance	Relative Importance
0	F	19.7059	
1	c	5.9474	
2	II	3.5991	

Fig. 5.8  
Importanța factorilor de intrare asupra ieșirilor a compozitului pentru alamă

Column	Input Name	Change from	to	Sensitivity	Relative Sensitivity
0	F	20.0000	50.0000	0.482944444	
1	c	2.8500	5.0000	0.075834302	
2	II	4000	6000	0.052548427	

Fig. 5.9  
Sensibilitatea factorilor de intrare asupra ieșirilor la compozitul pentru alamă

Al doilea indicator de apreciere a factorilor de intrare este reprezentat de sensibilitatea factorilor de intrare. Criteriile de alcătuire a acestei clasificări se bazează pe aprecierea variației mărimilor de ieșire atunci când mărimea de intrare variază între valoare minimă și maximă.

La compozitul pentru alamă, se constată aceeași clasificare, în ordine descrescătoare, atât la importanța cât și la sensibilitatea factorilor: 1. forța normală de apăsare; 2. cursa; 3. numărul de cicluri (fig. 5.8 și 5.9).

Se remarcă ponderea mare a forței, comparativ cu celelalte mărimi de intrare, ca importanță și sensibilitate asupra ieșirilor.

La materialul compozit pentru bronz, arhitectura rețelei neuronale este prezentată în fig. 5.10. Structura rețelei este [3-6-4-1] cu trei noduri pe stratul de intrare, un nod pe stratul de ieșire și cu două straturi ascunse având fiecare șase și, respectiv, patru neuroni.

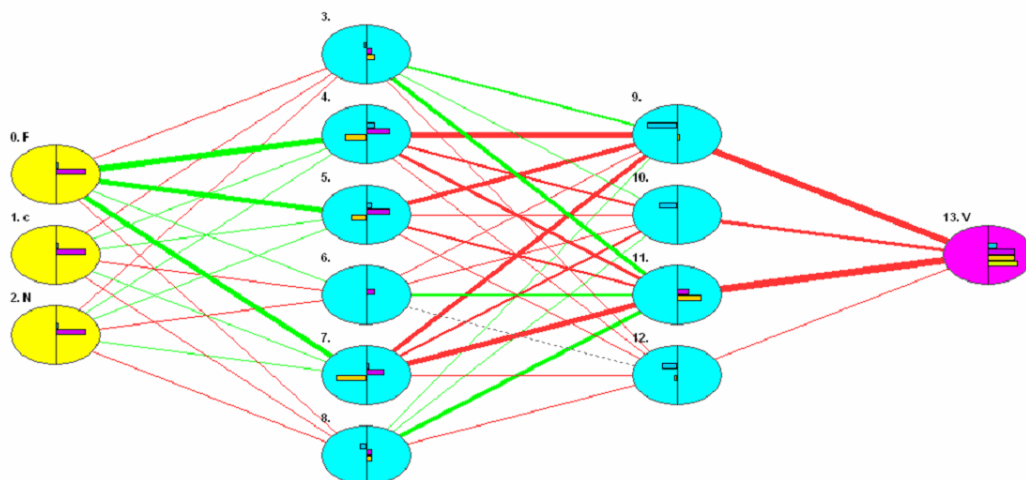


Fig. 5.10  
Arhitectura rețelei neuronale artificiale pentru determinarea volumului de uzură de uzură al compozitul pentru bronz

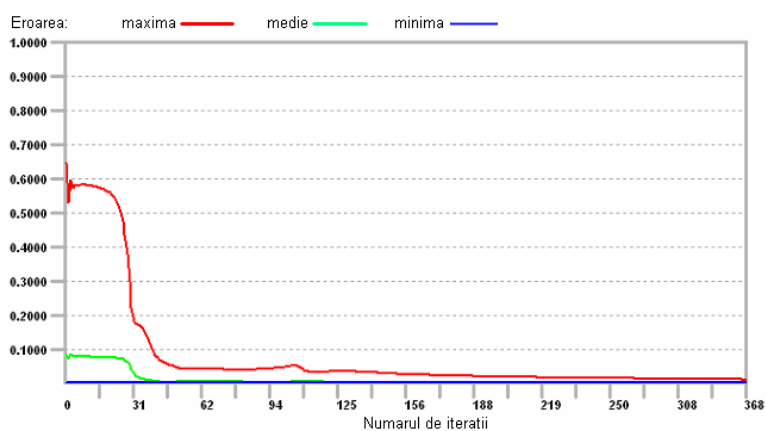


Fig. 5.11  
Evoluția erorii de antrenare în timpul instruirii rețelei neuronale a compozitului pentru bronz

Instruirea rețelei a fost terminată după 368 iterații. Din diagrama de evoluție a erorilor pe durata instruirii (fig. 5.11) se observă că rețeaua are o puternică convergență spre valori minime ale erorilor.

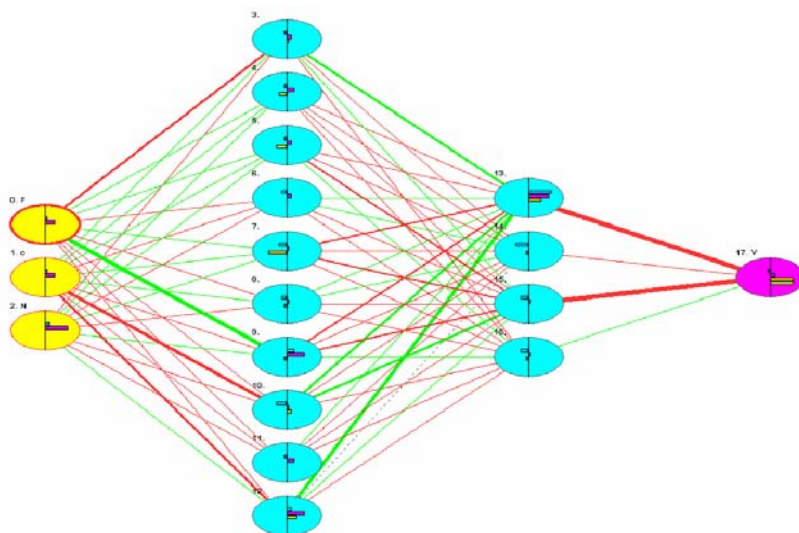


Fig. 5.14  
Arhitectura rețelei neuronale pentru determinarea volumului de uzură al compozitului moglice

Pentru compozitul moglice, arhitectura rețelei are forma din fig. 5.14: un strat de intrare cu trei neuroni, două straturi ascunse cu 10 și, respectiv, 4 neuroni; stratul de ieșire are un singur neuron și furnizează volumul de material uzat prin frecare.

Pentru instruirea rețelei s-au folosit aceiași parametri ca, de altfel, la toate materialele: eroarea țintă  $\delta=0,01$ , rata de învățare  $\eta=0,60$  și momentul 0,80.

În fig. 5.15 se arată modul cum evoluează, pe durata instruirii, eroarea de instruire. Se observă că procesul de învățare se încheie după 1022 de iterații.

Influența factorilor de intrare precum și sensibilitatea acestora asupra ieșirilor păstrează clasificările de la celelalte materialele compozite: forța normală, cursa și numărul de cicluri.

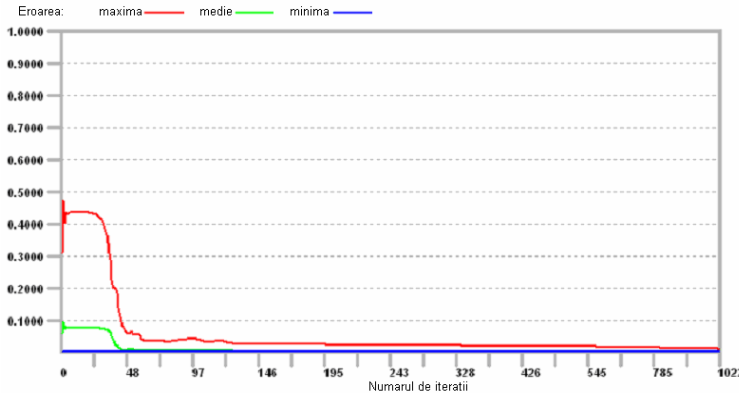


Fig. 5.15  
Evoluția erorii de antrenare în timpul instruirii rețelei neuronale a compozitului moglice

Alama și bronzul au aceeași arhitectură rețelei neuronale. Straturile ascunse, la ambele materiale, au aceleași numere de neuroni: 8 pe primul strat ascuns și câte 5 neuroni pe al doilea strat.

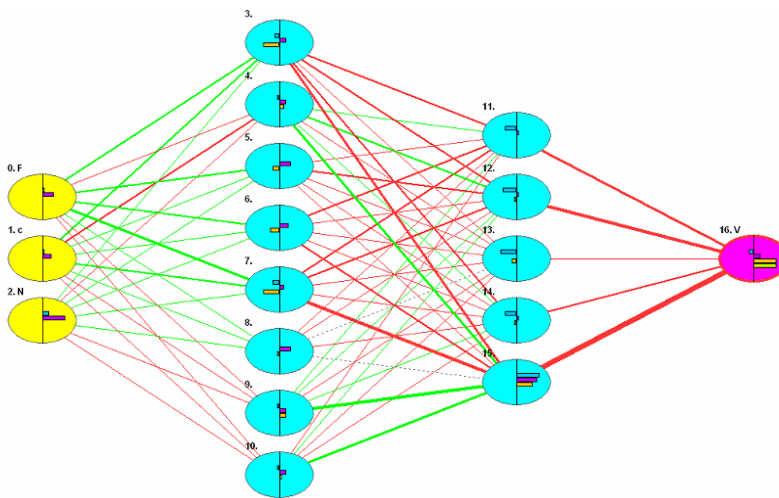


Fig. 5.18  
Arhitectura rețelei neuronale artificiale pentru determinarea volumului de uzură al alamei și bronzului

Alama și bronzul au aceeași arhitectură a rețelelor neuronale (fig. 5.18). În fig. 5.19 sunt arătate erorile de semnal ale alamei au o puternică convergență spre eroarea maximă impusă.

Importanța factorilor de intrare și sensibilitatea intrărilor asupra ieșirilor pentru alama și bronz au aceeași clasificare ca și la celelalte materiale. Forța normală, cursa și numărul de cicluri de la testare sunt, în această ordine, parametrii care influențează calitatea rețelei neuronale. Se remarcă creșterea importanței și sensibilității cursei de testare, ale căror valori sunt foarte apropiate de cele ale forței de încărcare.

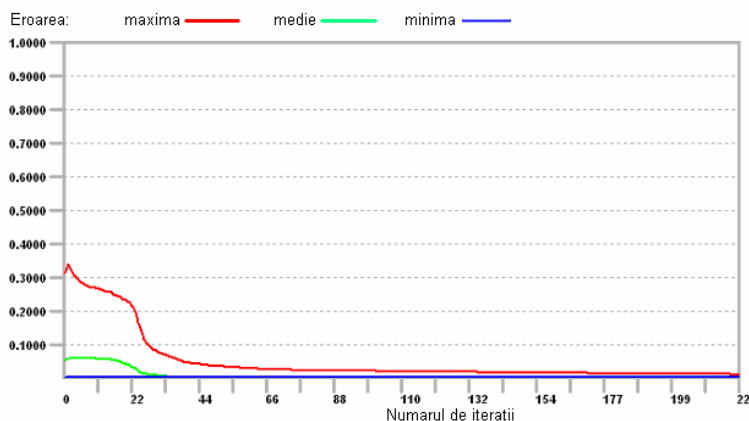


Fig. 5.19  
Evoluția erorii de antrenare în timpul instruirii rețelei neuronale a alamei

Rețeaua neuronală a bronzului se consideră instruită după 672 cicluri. Evoluția erorilor acestei rețele sunt arătate în fig. 5.23

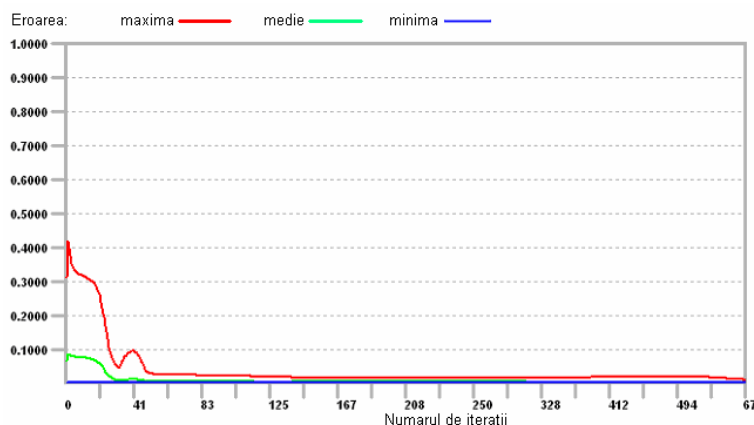


Fig. 5.23  
Evoluția erorii de antrenare în timpul instruirii rețelei neuronale a bronzului

#### 5.4. Validarea rețelelor neuronale și predicția volumului de uzură

Etapa de validare a unei rețele neuronale presupune introducerea în rețeaua neuronală a unui set de valori cunoscute, neutilizat la realizarea acesteia, și compararea rezultatelor furnizate de rețea cu cele introduse. Pentru validarea rețelelor la un material au fost realizate mai multe rețele neuronale cu combinații de 47 seturi de date din 48, câte unul fiind reținut pentru compararea rezultatului furnizat de rețea.

*Tabelul 5.7*  
*Rezultate previzionate cu rețelele neuronale*

Materialul	F [N]	c [mm]	N -	$V_{RN_3}$ [mm <sup>3</sup> ]
SAC	35	3	5200	0,0295
SAC	42	4,5	4500	0,0455
SBC	24	4,2	4200	0,0168
SBC	37	3	4800	0,0601
SMC	33	3	4300	0,0297
SMC	39	4,5	5600	0,2591
SA	44	3,2	3800	0,0989
SA	27	4,6	4600	0,1170
SB	47	3,5	5700	0,3786
SB	33	4,7	4400	0,3531

Cu ajutorul rețelelor neuronale pot fi efectuate predicții ale parametrilor de ieșire, alte valori decât cele utilizate pentru realizarea rețelelor, dar numai în limitele domeniului parametrilor de testare. Pentru exemplificare, în tabelul 5.7, sunt prezentate câteva rezultate.

### **5.5. Concluzii**

Construirea și utilizarea rețelelor neuronale pentru predicția volumului de material uzat ale celor cinci materiale studiate în această lucrare a condus la următoarele concluzii:

1. pentru toate materialele, arhitectura optimă este cea cu două straturi ascunse;
2. la aceeași structura a datelor de intrare și ieșire, structura și numărul neuronilor din straturile ascunse sunt diferite fiind influențate de valorile parametrilor de intrare/ieșire;
3. pentru aceiași parametri de setare ai rețelei neuronale, numărul ciclurilor de instruire, este influențat doar de valorile parametrilor de intrare/ieșire;
4. se constată că, la toate materialele studiate, forța de încărcare este mărimea cu cea mai mare influență asupra mărimilor de intrare, urmată de cursa mișcării și, în final, de numărul ciclurilor;
5. tot forța normală este mărimea cea mai sensibilă, adică mărimea ale cărei variații influențează cel mai puternic ieșirile; urmează, în ordine, cursa mișcării și numărul de cicluri;
6. la compozitul pentru alamă, indicatorii importanța și sensibilitatea mărimilor de intrare prezintă cele mai mari diferențe între parametrul forță și ceilalți parametri de intrare; la compozitul SMC sunt cele mai mici diferențe între mărimile de intrare, iar la metale aceste diferențe se reduc tot mai mult prin creșterea valorilor cursei la testare;
7. rezultatele validării rețelelor neuronale s-a făcut pe set de date ales aleatoriu; rezultatele furnizate de rețelele neuronale au dat erori relative de până la 17%; pentru erori relative mai mici este necesar ca instruirea rețelelor neuronale să fie făcută cu mai multe date ale parametrilor de intrare/ieșire;
8. metoda rețelelor neuronale aplicată pentru predicția volumului de material uzat poate fi extinsă și pentru alte mărimi caracteristice testării la uzură cum ar fi intensitatea de uzură sau coeficientul de uzură.

## Capitolul 6

# CONCLUZIILE GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI PERSPECTIVE

### 6.1. Concluzii generale

Teza de doctorat reprezintă rezultatul activității de documentare și cercetare științifică a comportamentului tribologic al unor materiale compozite polimerice ranforsate cu particule. În urma analizării rezultatelor experimentale obținute, se pot trage următoarele concluzii:

1. materialele compozite studiate în ceastă lucrare sunt materiale comerciale de înaltă performanță utilizate în lucrările de recondiționare a pieselor metalice solicitate la uzură;
2. materialele compozite prezintă un ansamblu de caracteristici fizico-mecanice importante: raport mare caracteristici mecanice/densitate, comparativ cu metalele, aspect ce duce la utilizarea acestora în industria aeronautică, aderență bună pe suprafețele metalelor, rigiditate, prelucrabilitate mecanică la fel ca materialele metalice pe care le recondiționează, etc;
3. tehnologia de aplicare a acestor compozite polimerice pe suprafețele metalelor sunt simple și mai puțin costisitoare;
4. aderența materialelor compozite pe suprafețele metalice se realizează la temperatura mediului ambiant prin reacții polimerice ce asigură o bună rezistență la desprindere;
5. materialele compozite au o structură eterogenă, foarte fină și compactă formată din matrice polimerică ranforsată cu particule dure, de diferite forme (aciculară, sferică, cvasisferică) aflate în diverse proporții;
6. coeficientul de frecare mediu al materialelor studiate este influențat de configurația de testare aleasă și de forța normală de încărcare; pentru fiecare caz în parte se poate face o clasificare a materialelor studiate după diverse criterii;
7. la configurația de testare știft-pe-disc, din punct de vedere al coeficientului de frecare mediu, la forța de 30 N, materialele compozite sunt superioare metalelor (coeficientul de frecare mic); la forțe mari (60 N), metalele sunt superioare compozitelor;
8. la testare în configurația bilă-pe-plan, o clasificare a materialelor după parametri de uzură stabilește ordinea: 1. compozitul SAC; 2. compozitul SMC; 3. alama; 4. bronzul; compozitul SBC are o evoluție a parametrilor de uzură puternic influențată de forța de încărcare;
9. analiza morfologică, prin imaginile realizate prin microscopie și profilometrie 3D, pun în evidență procese de uzură ca adeziunea, abraziunea, uzura prin oboseală, etc. cu ponderi diferite la compozite și la metale;
10. uzura de abraziune este prezentă la toate materialele, mai pregnant la metale unde se pot observa șanțuri, brăzdări, rizuri, etc.
11. indicii uzurii de adeziune se observă, de asemenea, la toate materialele, dar în mod deosebit la materialele compozite unde sunt vizibile lipiri și smulgeri de material, scobituri și exfolieri;



12. din cauza mișcării alternative repetate s-a putut observa fisuri la limita aglomerărilor de particule ale metalelor sau la interfața ranforsant-matrice la compozite;
13. o clasificare unică a materialelor, care să satisfacă toate criteriile (coeficient de frecare, parametri de uzură) nu este posibilă; clasificări se pot face pentru anumite condiții concrete de efectuare a testelor (configurație de testare, regim de testare, factori de influență);

Din efectuare testelor de zgâriere se desprind următoarele concluzii:

14. coeficientul de frecare mediu al tuturor materialelor crește odată cu forța de penetrare, cu excepția compozitului pentru alamă și a compozitului *moglice*, la care valorile coeficientului de frecare mediu, corespunzător forțelor de 30 N și 50 N, sunt aproximativ egale;
15. factorul de abrazivitate,  $f_{ab}$ , are valori cuprinse între 0 și 1, ceea ce înseamnă că prin zgâriere o parte din materialul din craterul urmei de zgâriere este depus pe margini sub formă de borduri, iar altă parte este îndepărtat prin abraziune.

Din modelul neuronal de predicție al volumului de material se deduc concluziile:

16. pentru toate materialele studiate, arhitectura optimă a rețelelor neuronale este cea cu două straturi ascunse;
17. o clasificare a importanței factorilor de intrare și a sensibilității lor asupra ieșirilor situează pe primul loc forța de încărcare, urmată de cursa mișcării și, pe ultimul loc, numărul de cicluri;
18. metoda rețelelor neuronale de predicție poate fi extinsă, după metodologia aplicată pentru volumul de material uzat, și la alte mărimi de caracterizare tribologică a acestor materiale (intensitatea uzurii, coeficientul de uzură, parametrii de profilometrie 2D).

## 6.2. Contribuții originale ale tezei

În urma efectuării cercetărilor asupra comportării la uzură a unor materiale compozite polimerice ranforsate cu particule, comparativ cu materialele metalice alama și bronzul, se rețin următoarele contribuții originale:

1. Realizarea unei documentații actualizate asupra comportării tribologice a materialelor compozite polimerice termorigide.
2. Proiectarea și realizarea unui program complex de cercetări privind caracteristicile mecanice, microstructurale și tribologice pentru toate materialele studiate: metale și compozite polimerice ranforsate cu particule metalice și anorganice, comercializate pe piață și utilizate la recondiționarea unor pieselor din alamă și bronz.
3. Crearea unei baze de date experimentale privind caracteristicile tribologice, mecanice și structurale ale materialelor cercetate.
4. Efectuarea unui studiu comparativ privind comportarea tribologică din punct de vedere al tribomodelului utilizat pentru testări, pentru materialele studiate;
5. Elaborarea unui program AutoLISP care se lansează și rulează în AutoCAD pentru desenarea profilogramelor 2D și colectarea informațiilor referitoare la aria profilogramelor.

6. Elaborarea unei metodologii simplificate pentru estimarea pierderilor de material la frecare uscată în configurația bilă-pe-plan pe baza informațiilor obținute prin rularea programului Auto LISP.
7. Evaluarea comportării tribologice a materialelor compozite și metalice prin:
  - studiul coeficientului de frecare în condițiile standardului ASTM G 133-05;
  - studiul urmelor de uzură prin analizarea parametrilor principali de uzură (lățime, adâncime, arie profilograme);
  - identificarea proceselor de uzură din stratul superficial al urmelor de uzură prin metode nedistructive (microscopie electronică SEM, microscopie optică, profilometrie 3D, etc.).
8. Aplicarea modelului neuronal pentru predicția volumului de material uzat în configurația bilă-pe-plan.

### 6.3. Direcții ulterioare de cercetare

Tinând seama de largă utilizare a acestor materiale compozite în lucrările de recondiționare a pieselor uzate sau de remediere a celor cu defecte de fabricație, se conturează câteva direcții de extindere a cercetărilor:

- Aprofundare cercetărilor la materialele studiate prin diversificarea condițiilor de efectuare a testelor (parametri de încărcare, durată, etc.) și a unor configurații de testare apropiate geometric de cele mai întâlnite aplicații practice.
- Extinderea cercetărilor și la alte materiale comerciale/noncomerciale utilizate la recondiționarea pieselor metalice, în special, fonte și oțeluri.
- Extinderea cercetărilor tribologice pentru materiale compozite studiate și în mediul lubrifiat și compararea rezultatelor cu cele corespunzătoare materialelor metalice obținute în aceleași condiții.
- Reluarea cercetărilor în regim uscat/lubrifiat la materialele compozite studiate în teză prin adăugarea și a altor ranforsanți în matricea polimerică.
- Studiarea caracteristicilor de adeziune pe bronz a compozitului *moglice* și a posibilității acestuia de a recondiționa piese din bronz solicitate la uzură având în vedere coeficientul de frecare mediu, la frecare uscată bilă pe plan, apropiat de cel al bronzului.
- Studiarea efectelor unor tratamente chimice sau adaosuri asupra comportării mecanice și tribologice a materialelor compozite luate în studiu.
- Extinderea folosirii rețelelor neuronale asupra mai multor parametri tribologici, mecanici și chimici.
- Studiarea unor parametri termici ai materialelor compozite (coeficient de dilatare termică, căldura specifică).

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Friedrich K., *Advances in Composites Tribology*, Elsevier Scientific Publishers, 1993, Amsterdam;
- [2] Hubca Gh., Iovu H., Tomescu M., *Materiale compozite*, Editura tehnică, 1999, București;
- [3] Stachowiak G.W., *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*, John Wiley & Sons Ltd, 2005, England;
- [4] Stachowiak G.W., Batchelor A.W., *Engineering Tribology*, Butterworth-Heinemann, 2002;
- [5] Ștefănescu F., *Compozite metalice*, Editura Matrix Rom, 1996, București;
- [6] Zgura Gh., Tonoiu I., Severin I., *Materiale compozite cu matrice metalică. Tehnologii de prelucrare*. Editura Academiei Romane, 2000, București;
- [8] Jiga G., *Noțiuni fundamentale în mecanica materialelor compozite*, editura Atlas Press, 2004, București;
- [9] Crawford R.J., *Plastics Engineering*, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann, 2002, Oxford;
- [10] Mareș M., *Materiale compozite. Proprietăți și modelare*, Editura Tehnopress, 2006, Iași;
- [11] \* \* \* CHM-17 (former Military Handbook–MIL-HDBK-17-3F) – *Composite Materials Handbook*, Volume 3 – Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis, published by U. S. Department of Defense, 2002;
- [12] \* \* \* *Properties and Performance of Polymer-Matrix Composites*, ASM Handbook, Vol. 21, 2001;
- [13] 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, p. 371–379, 2011, Ed.:Bulgarian-English Academic Pub. House, Sofia, Bulgaria;
- [14] Andrei, G., Dima D., Bîrsan I., Andrei L., Cîrciumaru A., *Effect of Ferrite Particles on Mechanical Behaviour of Glass Fibers Reinforced Polymer Composite*, Materiale plastice 46, Nr. 3, 2009, p. 284-287;
- [16] Murărescu M, Dima D., Andrei G., Cîrciumaru A., *Synthesis of polyester composites with functionalized carbon nanotubes by oxidative reactions and chemical deposition*, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, Vol. 9, No. 2, April-Mai 2014, p. 653 –665;
- [17] Ciupagea L., Andrei G., Dima D., Murărescu M., *Specific heat and thermal expansion of polyester composites containing singlewall -, multiwall - and functionalized carbon nanotubes*, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, Vol. 8, No. 4, October – December 2013, p. 1611 – 1619;
- [18] Ciupagea L., **Iliuță V.**, Andrei G., *Effect of Single-Wall Carbon Nanotubes on Thermal Properties of Polyester Composites*, The Annals of “Dunarea de Jos”

- University of Galați, Fascicle IX. Metallurgy and Materials Science, No. 2 – 2013, , p. 18-21;
- [19] Dima D, Murărescu M, Andrei G., *Dispersion of carbon nanotubes coated with iron (iii) oxide into polymer composite under oscillating magnetic field*, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures Volume: 5 Issue: 4 , Published: oct-dec. 2010, p. 1009-1014;
- [20] Andrei G., Deleanu L., Maftai L., Bîrsan, I., Besnea, A., *On wear Behaviour of a Composite Class with Micro-Nano Adding Particles and PA Matrix*, 2010, Materiale plastice Volume: 47 Issue: 3 Published: sep. 2010, p. 356-363;
- [21] Evans D.C., Lancaster J.K., *The wear of Polymers*, In: Scott, D. (ed.) *Treatise on Materials Science and Technology*, vol. 13, Wear , Academic Press inc., New York, 1979, p. 85-139;
- [22] Tomescu L., *Contribuții la studiul stratului superficial al compozitelor cu matrice de politetrafluoretilenă, pe tribomodele de alunecare*, teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, 1999;
- [23] Briscoe B. J., Sinha S. K., *Tribology of polymeric solids and their composites (capitol)*, in *Wear – Materials, Mechanism and Practice* (ed. G. Stachowiak), John Wiley & Sons, Chichester, England, 2005, p. 223-267;
- [24] Briscoe B.J., Sinha S.K., *Wear of Polymers*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 216, 2002, p. 401–413;
- [25] Dasari A., Yu Z-Z., Mai Y.-W., *Fundamental aspects and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites*, Materials Science and Engineering R 63, 2009, p. 31–80;
- [26] \* \* \* STAS 8069-87 - *Încercările metalelor. Încercarea la uzare. Clasificare si terminologie*;
- [28] Rîpă M., Deleanu L., *Deteriorări în tribosisteme*, Editura Zigotto, 2008, Galați;
- [29] Cao J-L., Choy K-L., Sum H-L., Li H-Q., Teer D., Bao M-D., *Syntheses of nano-multilayered TiN/TiSiN and CrN/CrSiN hard coatings*, J. Coat. Technol. Res., 8 (2) 2011, p. 283–288;
- [30] Cheng X.H., Shang-guan Q.Q., *Effect of rare earths on mechanical and tribological properties of carbon fibers reinforced PTFE composite*, Tribology Letters, Vol. 21, No. 2, February 2006, p. 153-160;
- [31] Wu L., Chen J-x., Liu M-y., Bao Y-w., Zhou Y-c., *Reciprocating friction and wear behavior of  $Ti_3AlC_2$  and  $Ti_3AlC_2/Al_2O_3$  composites against AISI52100 bearing steel*, Wear 266, 2009, p. 158–166;
- [32] Chattopadhyay C., Sangal S., Mondal K., Garg A., *Improved wear resistance of medium carbon microalloyed bainitic steels*, Wear 289, 2012, p. 168–179;
- [33] Klaffke D., Hartelt M., *Tribological characterization of thin hard coatings by reciprocating sliding tests*, Tribology Letters 1, 1995, p. 265-276;
- [34] Qu J., Truhan J.J., *An efficient method for accurately determining wear volumes of sliders with non-flat wear scars and compound curvatures*, Wear 261, 2006, p. 848–855;

- [35] Sharma S., Sangal S., Mondal K., 2013 - *On the optical microscopic method for the determination of ball-on-flat surface linearly reciprocating sliding wear volume*, *Wear* 300, 2013, p. 82-89;
- [36] Whittenton E.P., Blau P.J., *A comparison of methods for determining wear volumes and surface parameters of spherically-tipped sliders*, *Wear* 124, 1988, p. 291–309;
- [37] \* \* \* ASTM G 133 – 05 *Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear*;
- [38] \* \* \* ASTM Standard G 99-05, *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*, *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 03.02, 2005;
- [39] Islam Md. A., Farhat Z., *Wear of A380M Aluminum Alloy Under Reciprocating Load*, *Journal of Materials Engineering and Performance* Volume 19, Number 8, 2000, p. 1208-1213;
- [40] van der Heide E., Stam E.D., Giraud H., Lovato G., Akdut N., Clarysse F., Caenen P., Heikill I., *Wear of aluminium bronze in sliding contact with lubricated stainless steel sheet material*, *Wear* 261, 2006, p. 68–73;
- [41] \* \* \* Novacam, <http://www.novacam.com/pdf/volume-loss.pdf>, accesat pe 5.04.2014;
- [42] Iliuță V., Rîpă M., Andrei G., Preda A., *Tribological testing programs of composites materials for reciprocating sliding*, *The Annals of “Dunărea de Jos” University of Galați, Fascicle VIII, (XVIII), Issue 2 Tribology*, 2012, p. 33-42;
- [43] Li J., *Friction and wear properties of PA6 filled PTFE composites under oil lubrication*, *Current Applied Physics* 9, 2009, p. 1445–1449;
- [44] Li J., Cheng X.H., *Effect of rare earth solution on mechanical and tribological properties of carbon fiber reinforced thermoplastic polyimide composite*, *Tribology Letters* Volume 25, Number 3, 2007, p. 207-214;
- [45] Ge S., Wang S., Gitis N., Vinogradov M., Xiao J., *Wear behavior and wear debris distribution of UHMWPE against Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball in bi-directional sliding*, *Wear* 264, 2008, p. 571–578;
- [46] Li J., Li X.Z., *Evaluation of the Tribological Properties of Carbon Fiber Reinforced Poly(vinylidene fluoride) Composites*, *Journal of Materials Engineering and Performance* Volume 19, Number 7, 2010, p. 1025-1030;
- [47] Nie W.Z., Li J., Li X.Z., *The addition of carbon fiber on the tribological properties of poly(vinylidene fluoride) composites*, *Fibers and Polymers*, Volume 11, Number 4, 2010, p. 559-564;
- [48] Sharma M., Bijwe J., Singh K., *Studies for Wear Property Correlation for Carbon Fabric-Reinforced PES Composites*, *Tribology Letters*, Volume 43, Number 3, 2011, p. 267-273;
- [49] Achanta S., Drees, D., Celis J-P., *Friction and nanowear of hard coatings in reciprocating sliding at milli-Newton loads*, *Wear*, 259, 2005, p. 719–729;
- [50] Bonny K., Baets P. De, Vleugelset J., *Dry Reciprocating Sliding Friction and Wear Response of WC–Ni Cemented Carbides*, *Tribology Letters*, 31 [3], 2008, p. 199-209;
- [51] Cheng G., Ding J., Pu H., Ling Z., Kan B., *Preparation, Characterization and Frictional Properties of Silane Self-Assembled Elastomeric Nanocomposite Polymer*

- Layers, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. Feb. 2011, p. 75-78;
- [52] Jin Q., Liao G., Feng X., Zhang X., Jian X., *Preparation and characterization of poly(phthalazinone ether ketone)/SiO<sub>2</sub> hybrid composite thin films with low friction coefficient*, Journal of Sol-Gel Science and Technology Volume 46, Number 2, 2008, p. 208-216;
- [53] Liu Z., Neville A., Reuben R.L., Shen W., *The contribution of a soft thin (metallic) film to a friction pair in the running-in process*, Tribology Letters Volume 11, Numbers 3-4, 2001, p. 161-169;
- [54] Manoj Kumar B.V., Basu B., Vizintin J., Kalin M., *Tribochemistry in sliding wear of TiCN-Ni-based cermets*, J. Mater. Res., Vol. 23, No. 5, 2008, May, p. 1214-1227;
- [55] Perez Delgado Y., Bonny K., De Baets P., Neis P.D., Rodriguez Ferreira V., Malek O., Vleugels J., Lauwers B., *Dry sliding friction and wear response of WC-Co hardmetal pairs in linearly reciprocating and rotating contact*, Sustainable Construction and Design, 2011, vol. 2, issue 1, 2011, p. 12-18;
- [56] Sun Z., Wu L., Li M., Zhou Y., *Tribological properties of g-Y<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> ceramic against AISI 52100 steel and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic counterparts*, Wear 266, 2009, p. 960-967;
- [57] Wan D.T., Hu C.F., Bao Y.W., Zhou Y.C., *Effect of SiC particles on the friction and wear behavior of Ti<sub>3</sub>Si(Al)C<sub>2</sub>-based composites*, Wear, Volume 262, Issues 7-8, 15 March 2007, p. 826-832;
- [58] Wu J., Cheng X.H., *Friction and wear properties of Kevlar pulp reinforced epoxy composites under dry sliding condition*, Tribology Letters, Volume 22, Number 3, 2006, p. 259-263;
- [59] Guo J., Wang L., Wang S.C., Liang J., Xue Q., Yan F., *Preparation and performance of a novel multifunctional plasma electrolytic oxidation composite coating formed on magnesium alloy*, Journal of Materials Science Volume 44, Number 8, 2009, p. 1998-2006;
- [60] Iliuță V., Rîpă M., Andrei G., Suciuc C., Preda A., *Dry Reciprocating Sliding Friction and Tribological Behavior of Polymeric Composites Used to Repair Bronze Made Parts*, BALKANTRIB '14, International Conference on Tribology, 30<sup>th</sup>. Oct.-1<sup>st</sup>. Nov. 2014, Sinaia, Romania (acceptată pentru publicare în Proceedings);
- [61] Li F., Su Y.L., Wang J.P., Wu G., Wang C.T., *Influence of dynamic load on friction behavior of human articular cartilage, stainless steel and polyvinyl alcohol hydrogel as artificial cartilage*, Journal of Materials Science: Materials in Medicine, Volume 21, Number 1, 2010, p. 147-154;
- [62] Guo C., Zhou J., Zhao J., Wang L., Yu Y., Chen J., Zhou H., *Microstructure and Tribological Properties of a HfB<sub>2</sub>-Containing Ni-Based Composite Coating Produced on a Pure Ti Substrate by Laser Cladding*, Materials and Design 36, 2012, p. 482-489;
- [63] Vila M., Abreu C.S., Salgueiredo E., Almeida F.A., Fernandes A.J.S., Costa F.M., Gomes J.R., Silva R.F., *Reciprocating sliding behaviour of self-mated amorphous diamond-like carbon coatings on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics under tribological stress*, Thin Solid Films, Volume 515, Issue 4, 5 December 2006, p. 2192-2196.

- [64] Yin G. L., Huang P. H., Yu Z., He D. N., Tu J. P., *Microstructure, chemical and tribological investigations of  $Mo_xW_{1-x}S_y$  co-sputtered composite films*, Tribology Letters, Vol. 22, No. 1, April 2006, p. 37-43;
- [65] Yan X.B., Xu T., Chen G., Wang X.B., Liu H.W., Yang S.R., 2005, *Preparation and characterization of amorphous hydrogenated carbon films containing Au nanoparticles from heat-treatment of polymer precursors*, Applied Physics A: Materials Science & Processing 81, 2005, p. 197-203;
- [66] Li W., Qu S.X., Zhou Z.R., *Reciprocating sliding behaviour of human skin in vivo at lower number of cycles*, Tribology Letters Volume 23, Number 2, 2006, p. 165-170;
- [67] Qian SH., Ge SR., *Friction behavior of coupling motion for natural articular cartilage by reciprocating rotation*, Chinese Science Bulletin, Volume 54, Number 4, 2009, p. 576-583;
- [68] Zhang D.K., Shen Y.Q., Ge S.R., *Research on the friction and wear mechanism of Poly(vinyl alcohol)/hydroxylapatite composite hydrogel*, Science in China Series E: Technological Sciences, Volume 52, Number 8, 2009, p. 2474-2480;
- [69] Li J., Xia Y. C., 2009, *The Reinforcement Effect of Carbon Fiber on the Friction and Wear Properties of Carbon Fiber Reinforced PA6 Composites*, Fibers and Polymers, Volume 10, Number 4, 2009, p. 519-525;
- [70] Li J., Sheng X.H., *The Effect of PA6 Content on the Mechanical and Tribological Properties of PA6 Reinforced PTFE Composites*, Journal of Materials Engineering and Performance Volume 19, Number 3, 2010, p. 342-346;
- [71] Iliuță V., Rîpă M., Andrei G., Preda A., Suciuc C., Javorova J., *Profilometric Evaluation of the Worn Surfaces under Dry Reciprocating Wear Conditions of a Composite Material to Repair Brass Made Parts*, prezentată la IManE 2014 Intern. Conf., 29-30 Mai, 2014, Chișinău, MOLDOVA, (acceptată pentru publicare în *Applied Mechanics and Materials*, Ed. Trans Tech Publications Inc., Elveția);
- [72] Iliuță V., Preda A., Andrei G., Bîrsan I., *Wear Assessment of Polymer Composite Filled with Metal Particles Trough Ball-on-Flat Reciprocating Test*, (acceptată pentru publicare în revista *Materiale plastice Vol. 51, nr. 4/2014*);
- [73] Iliuță V., Rîpă M., Andrei G., *Wear Assessment under Reciprocating Wear Test Conditions of Metal Particles Reinforced Composite Material*, Scientific Conference of Doctoral Schools from UDJ Galați, Second Ediție, CSSD-UDJG 2014, "Dunarea de Jos" University of Galați, 15-16 of May 2014 (prezentare poster, abstract publicat);
- [74] Gonzales R., Hernandez Battez A., Blanco D., Viesca J.L., Fernandez-Gonzales A., *Lubrication of TiN, CrN and DLC PVD Coatings with 1-Butyl-1-Methylpyrrolidinium tris(pentafluoroethyl)trifluorophosphate*, Tribol Lett, 40, 2010, p. 269-277;
- [75] Ding H., Dai Z., Zhou F., Zhou G., *Sliding friction and wear behavior of TC11 in aqueous condition*, Wear 263, 2007, p. 117-124;
- [76] Iliuță V., Ciupagea (Coteț) L., Andrei G., Rîpă M., *Profilometric Analysis of Worn Surface of Bronze, Iron and Iron Composite Samples, by Pin-on-Disk Method*, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle IX. Metallurgy and Materials Science, No. 2 – 2013, p. 32-38;



- [77] Tomescu, L., Rîpă, M., Vasilescu E., Georgescu C. et al., *Surface profile of composites with PTFE matrix*, J. of Mat. Processing Tech., vol. 143–144, 2003, Ed. Elsevier Science Ltd., p. 384–389;
- [78] Miguel J.M., Vizcaino S., Lorenzana C., Cinca N., Guilemany J.M., *Tribological Behavior of Bronze Composite Coatings Obtained*, Tribol Lett, 42, 2011, p. 263–273;
- [80] Friedrich K., Sue H.J., Liu P., Almajid A.A., *Scratch resistance of high performance polymers*, Tribology International 44, 2011, p. 1032–1046;
- [81] Barletta M., A. Gisario A., Lusvarghi L., Bolelli G., Rubino G., *On the combined use of scratch tests and CLA profilometry for the characterization of polyester powder coatings: Influence of scratch load and speed*, Applied Surface Science 254, 2008, p. 7198–7214;
- [82] Barletta M., *Combined use of scratch tests and CLA profilometry to characterize polyester powder coatings*, Surface & Coatings Technology 203, 2009, pp.1863–1878;
- [83] Barletta M., Tagliaferri V., Gisario A., Venettacci S., *Progressive and constant load scratch testing of single- and multi-layered composite coatings*, Tribology International 64, 2013, p. 39–52;
- [84] Bermudez M.D., Brostow W., Carrion-Vilchesa F.J., Cervantes J.J., Pietkiewicz D., *Friction and multiple scratch behavior of polymer+monomer liquid crystal systems*, Polymer 46, 2005, p. 347–362;
- [85] Browning R.L., Lim G-T., Moyse A., Sue H.-J., Chen H, Earls J.D., *Quantitative evaluation of scratch resistance of polymeric coatings based on a standardized progressive load scratch test*, Surface & Coatings Technology 201, 2006, p. 2970–2976;
- [86] Jiang H., Browning R.t, Sue H-J., *Understanding of scratch-induced damage mechanisms in polymers*, Polymer 50, 2009, p. 4056–4065;
- [87] Kurkcu P., Andena L., Pavan A., *An experimental investigation of the scratch behaviour of polymers: 1. Influence of rate-dependent bulk mechanical properties*, Wear 290–291, 2012, p. 86–93;
- [88] Kurkcu P., Andena L., Pavan A., *An experimental investigation of the scratch behaviour of polymers - 2. Influence of hard or soft fillers*, Wear 317, 2014, p. 277–290;
- [89] Spânu C., *Studii și cercetări pe tribomodel, privind deformațiile plastice în stratul superficial la rostogolire și alunecare*, teză de doctorat, Universitatea "Dunarea de Jos" din Galați, 2002;
- [90] Spânu, C., Teletin, C., Boiciuc, S., *Use of sliding indentation for tribological characterization of some metallic materials*, Mechanical Testing and Diagnosis, 2014 (III), Volume 1, (acceptată la publicare);
- [91] \* \* \* ASTM G 171 – 03, *Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus*;
- [92] \* \* \* ISO 19252:2008 *Plastics — Determination of scratch properties*;
- [93] \* \* \* EN1071 *Methodes of test for ceramic coatings*;

- [94] Briscoe, B.J. and Sinha, S.K., *Scratch resistance and localized damage characteristics of polymer surfaces - a review*, Materialwissenschaft und Werkstoff technik 34, 2003, p. 989–1002;
- [98] Sinha S.K., Song T., Wan X., Tong Y., *Scratch and normal hardness characteristics of polyamide 6/nano-clay composite*, Wear 266, 2009, p. 814–821;
- [99] Surampadi N.L., Ramiseti N.K., Misra R.D.K., *On scratch deformation of glass fiber reinforced nylon 66*, Materials Science and Engineering A 456, 2007, p. 230–235;
- [101] Muller B., Reinhardt J., Strickand M.T., *Neural Network. An Introduction*, Springer, 1995;
- [102] Zeng P., *Neural computing in mechanics*, Applied Mechanics Reviews, vol. 51, 1998, p. 173-197;
- [103] Roman I., *Contribuții la studiul proprietăților mecano-tribologice ale unor compozite polimerice epoxidice*, teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, 2012;
- [104] Rîpă M., Frangu L., *A Survey of Artificial Neural Networks Applications in Wear and Manufacturing Processes*, The Annals of University "Dunărea de Jos" of Galați Fascicle VIII, 2004, Tribology;
- [105] Frangu, L., Rîpă, M., *Artificial Neural Networks Applications in Tribology - A Survey*, NATO Advanced Study Institute on Neural Networks for Instrumentation, Measurement and Related Industrial Applications (NIMIA-SC2001), Crema, Italy, Oct. 9-20, 2001;
- [106] Choi S.W., Song E. J., Hahn H.T., *Prediction of fatigue damage growth in notched composite laminates using an artificial neural network*, Composites Science and technology, vol. 63, 2003, p. 661-675;
- [107] Suresh A., Harsha A.P., Ghosh M. K., *Solid particle erosion studies on polyphenylene sulfide composites and prediction on erosion data using artificial neural networks*, Wear, vol. 266, July 2009, p. 184-193;
- [108] Ciliz M.K., Tomizuka M., *Friction modelling and compensation for motion control using hybrid neural network models*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 20, February 2007, p. 898-911;
- [109] Zhang Z., Friedrich K., *Artificial neural networks applied to polymer composites: a review*, Composite Science Technology, vol. 63, 2003, p. 2029-2044;
- [110] Kadi H.E., *Modelling the mechanical behavior of fiber-reinforced polymeric composite materials using artificial neural networks*, Composite Structures, vol. 73, 2006, p. 1-23;
- [111] Aleksendric D., Duboka C., *Prediction of automotive friction material characteristics using artificial neural networks-cold performance*, Wear, vol. 261, 2006, p. 269-282;
- [112] Nasir T., Yousif B.F., McWilliam S., Salih N.D., Hui L.T., *An artificial neural network for prediction of the friction coefficient of multi-layer polymeric composites in three different orientation*, Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 224, July 2009, p. 419-429;
- [113] Jiang Z., Gyurova L.A., Scharb K., Friedrich K., Zhang Z., *Study of friction and wear behavior of polyphenylene sulfide composites reinforced by short carbon fibers and sub-micro TiO<sub>2</sub> particles*, Composites Science and Technology, vol. 68, 2008, p. 734-742;

- [114] Albidewi I.A., *Wear particles surface identification using neural network*, International Journal of Computer Science and Network Security, vol. 8, January 2008, p. 262-265;
- [115] Venkateshwaran N., Elayaperumal A., Alavudeen A., Thiruchitrabalambalam M., *Review of Artificial Neural Network and Taguchi Application in Polymer Matrix Composites*, Rev. Adv. Mater. Sci. 29, 2011, p. 100-103;
- [117] Zhang Z., Barkoula N.-M., Karger-Kocsis J., Friedrich K., *Artificial neural network predictions on erosive wear of polymers*, Wear 255, 2003, p. 708–713;
- [129] \* \* \* Diamant Metallplastic GmbH, prospects available at <http://diamant.ph>, accessed: 14.12.2010;
- [130] \* \* \* <http://www.moglice.com/moglice.html>, accesat în data de 12.07.2014;
- [131] \* \* \* Raport tehnic final, Uzinsider Engineering SA, Proiect PNCDI 2-INOVARE, contract AMCSIT nr. 118 / 28.09.2007, „Tehnologii noi, ecologice si economice pe baza de materiale compozite, pentru reconditionarea reperelor componente ale utilajelor siderurgice” (Contractor: Uzinsider Engineering, partener: UDJG);
- [132] \* \* \* SR CR 12776:2002 - *Cupru și aliaje de cupru. Prevederi și proceduri pentru alocarea numerelor de material și pentru înregistrarea materialelor*;
- [133] \* \* \* STAS 198/2:1992 - *Aliaje cupru-aluminiu turnate în piese*;
- [136] \* \* \* *UMT Multi-Specimen Test System, Hardware Installation & Applications Manual*;
- [137] \* \* \* *UMT Multi-Specimen Test System, Software Operating Manual*, Version 1.116, Build 222, 2007;
- [138] \* \* \* *UMT Multi-Specimen Test System, Viewer Manual*, Version 2.14 Build 77, 2007;
- [139] \* \* \* *NanoFocus AG μScan® – Instruction Manual*;
- [140] \* \* \* *Manual for Surtronic 3+ Profilometer*;
- [141] \* \* \* *Standard Operating Procedure FEI Quanta 200 Scanning Electron Microscope*, [http://www.engr.sjsu.edu/MC2/SOP\\_QUANTA.pdf](http://www.engr.sjsu.edu/MC2/SOP_QUANTA.pdf), accesat: 10.10.2013;
- [142] \* \* \* *Instructions Bx60m System Microscope*;
- [143] Rîpă M., Tomescu L., *Elemente de tribologie*, Editura Fundației Universitare „Dunărea de Jos”, 2004, Galați;
- [145] Rabinowicz E., *Friction and Wear of Materials*, John Wiley and Sons, 1965;
- [147] Zum Gahr K-H., *Modelling of Two-Body Abrasive Wear*, Wear, Vol. 124, 1988, p. 87-103;
- [150] \* \* \* *The ANN Book*, GNU Public License, 1998;
- [151] Krose B., Van Der Smagt P., *An Introduction to Neural Network*, University of Amsterdam, 1996;
- [152] Engel A., *Complexity of learning in artificial neural networks*, Theoretical Computer Science, vol. Elsevier Science, no. 265, 2001, p. 285-306;
- [153] Rojas R., *Neural Networks*, Springer-Verlag, 1996;
- [154] Freeman J.A., Skapura D.M., *Neural Networks. Algorithms, Applications, and Programming Techniques*, Addison-Wesley Publishing Company, 1991.