

139.894



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI  
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI  
ȘI PROTECȚIEI SOCIALE  
AMPOSDRU



Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



MINISTERUL  
EDUCAȚIEI  
CERCETĂRII  
TINERETULUI  
ȘI SPORTULUI

OPORDRU



UNIVERSITAS  
GALATIENSIS

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

**Facultatea de Mecanică**

**Ing. Besnea Maria-Aida-Cristina**

**Studiul influenței aditivilor asupra  
comportării mecanice și tribologice a  
compozitelor polimerice cu matrice de  
polifenilen sulfură**

266.751



**Conducător doctorat**

**Prof. Univ. Dr. Ing. Gabriel Andrei**

**Galați, 2011**

## Cuprins rezumat

<b>Cap.1. Stadiul actual al cercetărilor asupra compozitelor polimerice cu aditivi microscopici</b>	1
1.1. Materialele compozite	2
1.2. Performanțele maselor plastice în funcție de temperatură	3
1.3. Compozite cu matrice din polifenilen sulfură	4
1.3.1. Caracteristici generale ale PPS	4
1.5. Obiectivele tezei	6
<b>Cap. 2. Comportarea mecanică a compozitelor cu matrice de polifenilen sulfură</b>	7
2.2. Deformarea polimerilor semicristalini	7
2.2.1. Mecanismul de deformare elastică	7
2.2.2. Mecanismul deformării plastice	8
2.7. Legi de comportare mecanică ale polimerilor solizi	9
2.8. Identificarea parametrilor legii de comportare mecanică	11
2.8.1. Materiale, metode și echipamente utilizate	11
2.8.3. Metoda de identificare a parametrilor legii de comportare	12
<b>Cap. 3. Comportarea tribologică a compozitelor cu matrice din polifenilen sulfură</b>	15
3.1. Generalități	15
3.3. Coeficientul de frecare dinamic	15
3.4. Evoluția coeficientului de frecare în funcție de regimul de testare și de material	16
3.5. Corelația între coeficientul de frecare și temperatura înregistrată la contactul dintre știft și disc	21
3.6. Analiza ratei specifice de uzură a compozitelor cu matrice PPS	22
<b>Cap. 4. Analiza calității suprafețelor uzate a compozitelor testate prin profilometrie 3D</b>	24
4.1. Introducere	24
4.2. Metodologia de măsurare	24
4.4. Influența parametrilor de testare asupra parametrilor 3D ai topografiei suprafeței	25
4.4.1. Calitatea suprafețelor discurilor din material compozit PPS GF 40	25
4.4.2. Calitatea suprafeței discurilor din material compozit PPS PVX, după testare	27
4.5. Discuții	28
<b>Cap. 5. Concluzii finale</b>	30
Contribuții personale	31
Direcții de cercetare	32
<b>Bibliografie</b>	33

## CAPITOLUL 1

### STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR ASUPRA COMPOZITELOR POLIMERICE CU ADITIVI MICROSCOPICI

Dezvoltarea materialelor plastice a început încă din anii 1930 și continua și astăzi. Primul patent pentru poliamide a fost obținut în 1931. Înaintea primului război mondial au fost dezvoltate rășinile acrilice precum și copolimerii bazați pe stiren (ABS) și politetrafluoroetilenă (PTFE).

PTFE a fost introdus în producția de masă în 1950 sub denumirea comercială de Teflon de firma Du Pont [32, 82, 96]. În 1950, policarbonații au fost introduși de General Electric, iar rășinile acetalice au fost dezvoltate de Celanese [82].

În perioada 1960-1980 au fost descoperiți majoritatea polimerilor cu performanțe ridicate folosiți astăzi - printre care poliamidele (PA), polietersulfura (PES), polifenilen sulfura (PPS), polieter-eter-cetona (PEEK), polietreimida (PEI) precum și polifenilen oxid (PPO) și polibutilentereftalat (PBT).

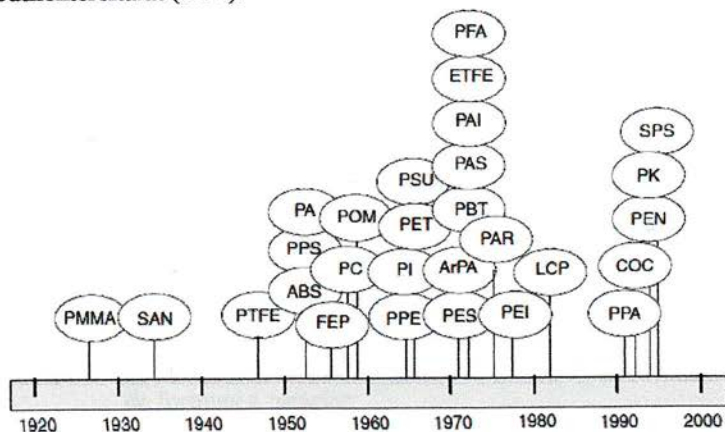


Fig. 1.1. Cronologia dezvoltării polimerilor termoplastici comerciali [82]

În figura 1.1 este ilustrată cronologia dezvoltării polimerilor termoplastici comerciali luând în considerare proprietățile relevante ale polimerilor. Se constată că majoritatea materialelor plastice tehnice a fost introdusă la scară industrială în perioada 1950-1980. Noua revenire din anii 1990 a fost parțial încurajată de anumite evenimente, cum ar fi dezvoltarea catalizatorilor ce au făcut convenabilă fabricarea unor noi materiale. Pentru fiecare familie de polimeri cei mai importanți producători lucrează cu

denumiri comerciale în scopul de a ajuta la identificarea mai ușoară a materialului și a-și promova propriile mărci [32, 82, 96].

### 1.1. Materialele compozite

Un material compozit este realizat atunci când două sau mai multe materiale, printr-o tehnologie de amestecare și prelucrare, conduc la un produs cu un set de proprietăți adecvate unor aplicații greu de obținut cu fiecare component în parte. Compoziția poate cuprinde materiale de același tip, de exemplu două metale care au în stare solidă structuri diferite sau materiale diferite, ca de exemplu sticlă și material plastic.

Materialele compozite sunt alcătuite din două structuri fundamentale: matricea (mediul solid continuu) și faza dispersă (umplutura, armătura, materialul de ranforsare sau rigidizare) [8, 82, 105, 110].

Dupa natura matricei se disting:

- compozite organice (polimerice) MCP;
- compozite cu matrice metalică MCM;
- compozite ceramice MCC.

Compozitele polimerice sunt acele materialele care au în compoziția lor cel puțin doi componenți, cu structură chimică diferită, termodinamic compatibili, dispersați reciproc sau asociați, cel puțin unul din componenți fiind o fază polimerică. Aceste noi materiale prezintă următoarele avantaje:

- sunt mai ușoare, datorită densității reduse a matricei;
- prezintă raportul rezistența/densitate mai mare decât la materiale clasice;
- prezintă performanțe deosebite;
- au rezistență bună la oboseală;
- au rezistență la acțiunea corozivă a factorilor de mediu;
- au consum redus de energie în ceea ce privește tehnologiile de formare a pieselor;
- raportul performanțe/preț ridicat.

Matricea și armătura au, de obicei, proprietăți opuse. Astfel, dintr-o matrice moale și o armătură dură, sau dintr-o matrice dură și o armătură moale se poate obține un compozit de câteva ori mai rezistent față de componentul mai slab. Distribuția armăturii în matrice poate fi diferită, particulele pot fi repartizate uniform sau neuniform, în șiruri liniare sau aglomerări pe anumite plane ceea ce duce la variații ale proprietăților mecanice (fig. 1.2).

După natura armăturii, compozitele pot fi sub formă de:

- compozite ranforsate cu pulberi și particule cu forme diferite (microsfere, fulgi, cilindrice sau forme neregulate) și de dimensiuni diferite (de la pulbere de ordinul nanometrilor și micronilor, la particule de câțiva mm);
- compozite ranforsate cu fire sau fibre continue, discontinue și filme scurte (*whiskers*) din fibre de sticlă, fibre de carbon, fibre de bor, carbură de siliciu, azbest sau fibre ceramice;
- compozite ranforsate cu formațiuni bidimensionale (lamelle, folii, solzi).

Proprietățile compozitelor depind de mai mulți factori:

- dimensiunile și geometria armăturii;
- natura matricei și a umpluturii;
- compatibilitatea matricei cu armătura;
- raportul volumic sau masic matrice/armătură;
- sensibilitatea materialelor componente la factorii de mediu (umiditate, temperatură).

## 1.2. Performanțele materialelor plastice în funcție de temperatură

Clasificarea compozitelor se mai poate face și după performanțele matricei polimerice, respectiv rezistența la temperatură (fig. 1.9) [82].

În figura 1.10 sunt prezentate temperaturile de lucru ale polimerilor (temperatura medie, pe termen scurt și pentru aplicații specifice). Materialele plastice pot fi grupate astfel:

1. Grupa "materialelor plastice de bază". Aceste materiale sunt utilizate pe scară largă au o largă aplicabilitate, preț scăzut și proprietăți limitate. Exemple: polistirenul (PS), polietilena (PE), policlorură de vinil (PVC).

2. Materialele plastice tehnice generale. Exemple: poliacetal (POM), poliamida (PA), policarbonat (PC), polibutadienereftalat (PBT), polietilentereftalat (PET).

3. Materiale plastice tehnice avansate (materiale plastice de înaltă performanță). Aceste materiale au proprietăți mecanice foarte bune la temperaturi ridicate, oferind o viață mai lungă produsului. Din această categorie fac parte: polisulfone (PSU), fluoropolimerii, polieterimidele (PEI), poliariletercetonele (PAEK), polifenilen sulfura (PPS), poliimida (PI).

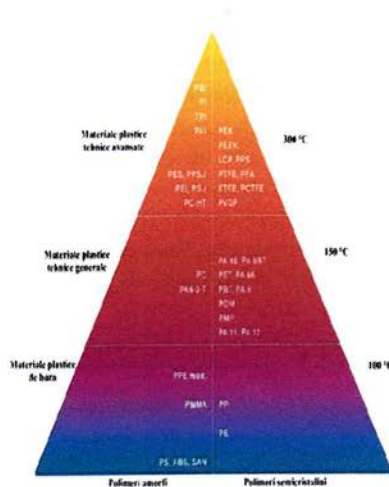


Fig. 1.9. Piramida performanțelor materialelor plastice tehnice generale și avansate [176]

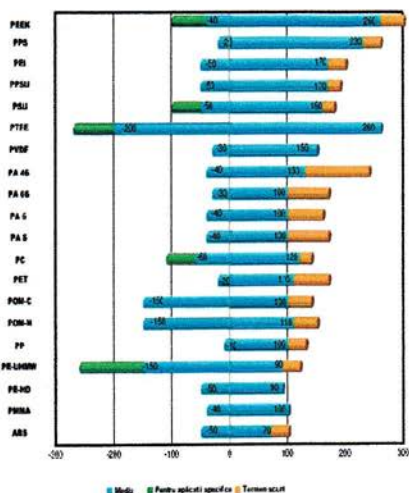


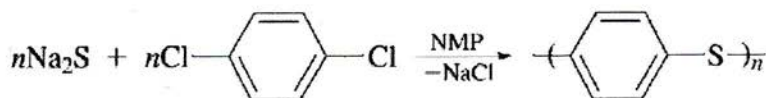
Fig. 1.10. Temperaturile de lucru ale polimerilor [°C] [176]

### 1.3. Compozite cu matrice de polifenilen sulfură

#### 1.3.1. Caracteristici generale ale PPS

Polifenilenulfura (PPS) este un polimer important folosit în inginerie, a cărui cercetare a fost mult aprofundată în ultimii ani. PPS, care este un polimer semi-cristalin cu temperatura de tranziție în stare vitroasă,  $T_g$  în jur de 85°C și temperatura de topire,  $T_m$  de aproximativ 265°C, este rezistent la foc și prezintă rezistență chimică mare [44, 82, 99, 115, 122]. Datorită proprietăților sale globale, PPS este folosită ca matrice pentru compozitele termoplastice [36, 82, 85, 126].

Edmonds și Hill au dezvoltat pentru prima dată o metodă de obținere comercial fezabilă pentru polifenilenulfura (PPS) [62, 82]. Procesul implică policondensarea p-diclorbenzenului cu sulfat de sodiu sau hidrosulfid de sodiu /hidroxid de sodiu în N-metil-2-pirolidinonă (NMP) la 260°C și presiunea crescută. Metoda de obținere a polifenilenulfurii este următoarea:



Datorită structurii, polifenilen sulfura prezintă rezistență bună la temperaturi mari, rezistență chimică bună datorită prezenței legăturii unui atom de sulf electronegativ la nucleul aromatic [82]. Polifenilen sulfura are o stabilitate termică bună, astfel încât pierderile izotermice de greutate în funcție de timp au fost măsurate la diferite temperaturi. Aceste rezultate indică o bună rezistență la degradare termică până la 370°C [75, 91, 96, 104]. PPS prezintă rezistență excelentă la solvenți, fiind aproape în totalitate insolubilă în solvenți organici, până la 198°C. Nu este afectată decât de expunerea la temperaturi ridicate la câțiva solvenți organici, acizi minerali puternici și medii puternic oxidante [32, 35, 44, 91]. Temperatura de funcționare fără întrerupere este cuprinsă între 165° C și 225° C, în funcție de materialele de aditivare și ranforsare folosite [96, 104].

În domeniul mecanic, PPS și-a găsit rapid întrebuințări în liniile de procesare a substanțelor chimice (ex. realizarea pompelor cu roți dințate). Recent, polimerul și-a găsit aplicații în sectorul construcțiilor de automobile, ca rezultat al abilității lui de a rezista acțiunii corosive a gazelor de eșapament, etilen glicolului și benzinei [36].

Utilizări specifice includ valve de retur ale gazelor de eșapament pentru controlul poluării, părți ale carburatorului, plăci de aprindere și valve de control al debitului pentru sistemele de încălzire. Materialul își găsește întrebuințări și în aparatele electrocasnice pentru gătit, produse medicale sterilizabile, echipament de laborator dentar și general, în componente ale uscătoarelor de păr [26]. Prin comparație cu alte termoplastice ranforsate cu fibre de sticlă, materialele cu matrice de PPS sunt în general considerate ca posedând o bună capacitate de procesare. Proprietăți bune de curgere la temperaturile de procesare permit producerea unor secțiuni cu pereți subțiri [26, 36].

Ca o consecință a acestei comportări de curgere ușoară trebuie să se ia măsuri pentru a se minimiza curgerea mulajelor și acest lucru a dus la comercializarea unor variante de PPS cu proprietăți de curgere diminuate [26].

Temperaturile de înmuiere sunt, în general, în jurul valorii de 135°C, valori ce optimizează procesul de cristalizare și dau astfel produselor modelate cea mai mare rigiditate, stabilitate dimensională, stabilitate termică și finisare a suprafeței. Totuși se pot folosi și tehnici de modelare la temperaturi relativ joase, de până la 30°C, pentru a se reduce cristalizarea și a se obține produse cu o mai mare durabilitate și rigiditate, dar în detrimentul rezistenței la caldură și cu o suprafață cu aspect mat [104].

### 1.5. Obiectivele tezei

Accastă lucrare are ca scop studiul influenței aditivilor asupra comportării mecanice și tribologice a compozitelor polimerice cu matrice de polifenilen sulfură, prin efectuarea de teste mecanice de compresiune și teste tribologice de tip știft – pe – disc.

În vederea realizării studiului, se propun următoarele:

- ❖ stabilirea unei metodologii de cercetare, a unui program de teste mecanice prin realizarea de teste de compresiune la diferite viteze de deformare și condiții normale de temperatură și a unui program de teste tribologice de tip știft-pe-disc în regim uscat, pentru regimuri de testare cât mai apropiate de cele ale unui sistem real;
- ❖ studierea influenței aditivilor folosiți asupra comportării mecanice și tribologice a compozitelor cu matrice de polifenilen sulfură;
- ❖ stabilirea legii de comportare a compozitelor, care să descrie cât mai bine comportarea neliniară a compozitelor studiate și identificarea parametrilor acesteia;
- ❖ identificarea proceselor tribologice din stratul superficial al compozitelor prin microscopie optică și electronică;
- ❖ analiza câmpului termic dezvoltat în timpul testelor tribologice;
- ❖ influența aditivilor, a vitezei de alunecare și a sarcinii medii de încărcare în contact asupra câmpului termic generat prin frecare;
- ❖ studiul dependenței uzurii compozitelor de aditivii utilizați, de viteza de alunecare și de forța normală în contact;
- ❖ studierea microtopografiei suprafeței prin profilometrie 3D, identificarea proceselor de uzură din stratul superficial și corelarea parametrilor 3D ai topografiei suprafețelor uzate cu parametri de testare.



## CAPITOLUL 2

### COMPORTAREA MECANICĂ A COMPOZITELOR CU MATRICE DE POLIFENILEN SULFURA

Materialele compozite, reprezentate caracteristic noilor materiale, devin treptat parte componentă esențială a sistemelor tehnice datorită avantajelor pe care le oferă în comparație cu materialele clasice:

- greutate scăzută;
- rezistență mare la uzură și coroziune;
- rezistență la oboseală satisfăcătoare;
- facilitare la asamblarea părților componente ale structurilor.

Aceste noi tipuri de materiale sunt utilizate într-o gamă largă de domenii, de la structuri aerospațiale până la echipamente sportive și casnice. Caracteristica generală a materialelor compozite este că, prin analiza lor combinată la nivel micro și macro mecanic, se poate ajunge la realizarea materialului conform cerințelor utilizatorului. Elaborarea materialelor compozite este complexă, condițiile de operare în care trebuie să funcționeze aceste materiale sunt unele severe, iar proprietățile mecanice, fizice, chimice și electrice sunt influențate de compatibilitatea dintre elementele componente.

#### 2.2. Deformarea polimerilor semicristalini

##### 2.2.1. Mecanismul de deformare elastică

Deformarea elastică a polimerilor are loc la sarcini relativ scăzute pe curba tensiuni-deformații (fig. 2.6). Apariția deformațiilor elastice pentru

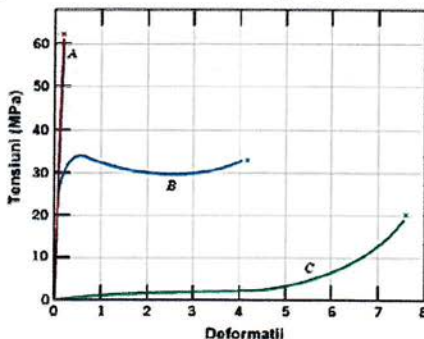


Fig. 2.6. Comportarea materialelor: fragile (curba A), plastice (curba B), elastomerică (curba C). [36]

polimerii semi-cristalini rezultă din deformarea lanțului molecular în regiunile amorfe, acestea alungindu-se în direcția de aplicare a solicitărilor la tracțiune. Acest proces este reprezentat schematic prin două lamele adiacente și materialul interlamelar amorf, în etapa 1 (fig. 2.7) [36].

În a doua etapă, deformarea continuă are loc prin schimbări în ambele

regiuni: în partea amorfă cât și în zonele cristaline. După cum se prezintă în figura 2.7c zonele amorphe continuă să se alinieze și să devină alungite; în plus, există și întinderea lanțului de legături puternice covalente în interiorul cristalitelor.

### 2.2.2. Mecanismul deformării plastice

Tranziția de la deformarea elastică la starea de deformare plastică are loc în etapa a treia din figura 2.8 [36]. Lanțurile din lamele alunecă unul peste altul, astfel încât faldurile se orientează în direcția axei de tracțiune (fig. 8b). Oricărei deplasări a lanțului i se opune o rezistență relativ slabă a legăturilor secundare sau van der Waals. În etapa a patra - are loc separarea segmentelor de bloc cristalin, iar în etapa a cincea - blocurile și lanțurile se orientează pe direcția axei de tracțiune.

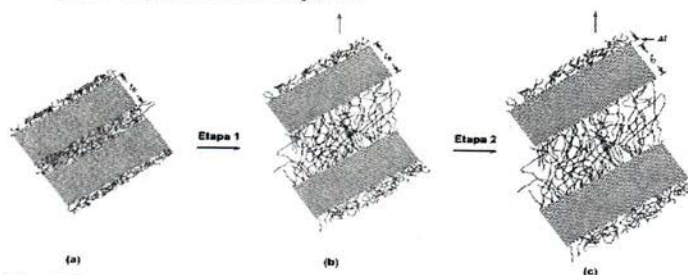


Fig. 2.7. (a) Deformarea elastică a polimerilor semicristalini, (b) modificarea continuă a regiunilor amorphe și cristaline, (c) alungirea regiunii amorphe [36]

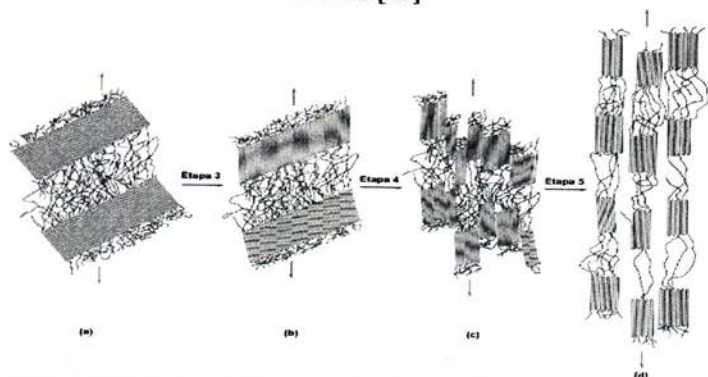


Fig. 2.8. (a) Stadiul de deformare plastica a polimerilor, (b) alunecarea lanțurilor unul pe lângă altul, (c), (d) blocurile și lanțurile se orientează pe direcția de alungire

## 2.7. Legi de comportare mecanică ale polimerilor solizi

Există mai multe legi de comportare care țin cont de relația tensiuni – deformații și viteza de deformare, după cum urmează :

$$\text{Norton Hoff} \quad \sigma = K \dot{\varepsilon}_p^m \quad (2.29)$$

$$\text{Hollomon} \quad \sigma = K \varepsilon_p^n \dot{\varepsilon}_p^m \quad (2.30)$$

$$\text{Marciniak} \quad \sigma = K(\varepsilon_p + \varepsilon_0)^n \dot{\varepsilon}_p^m \quad (2.31)$$

$$\text{Green} \quad \sigma = K \varepsilon_p^n (1 + \alpha \dot{\varepsilon}_p^m) \quad (2.32)$$

$$\text{Wagoner} \quad \sigma = K(\varepsilon_p + \varepsilon_0)^n (\dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0) \quad (2.33)$$

Pentru relațiile (2.29)...(2.33)  $\sigma$  – tensiunile [MPa],  $K$  – factor de scalare [MPa],  $\varepsilon_p$  – deformația plastică,  $\dot{\varepsilon}_p$  – viteza de deformare în domeniul plastic,  $n$  – coeficientul de ecruisare,  $m$  – parametrul de sensibilitate la viteza de deformare [63].

Reologia polimerilor solizi este definită de o comportare mecanică complexă elasto-vâsco-plastică. În literatura de specialitate au fost propuse multe legi pentru a descrie această comportare. Acestea se bazează pe un principiu de separare a variabilelor și sunt constituite din mai multe funcții ce țin cont de temperatură, deformații și viteza de deformare ( $F$  - caracterizează sensibilitatea tensiunilor în raport cu deformațiile,  $G$  - caracterizează sensibilitatea tensiunilor în raport cu viteza de deformație,  $K$  - factor de scalare).

- Legi de tip "multiplicativ":

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = K \times F(\varepsilon) \times G(\dot{\varepsilon}) \quad (2.34)$$

- Legi de tip "aditiv":

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = F(\varepsilon) + G(\dot{\varepsilon}) \quad (2.35)$$

Comportarea materialelor în diferite stadii de deformare necesită efectuarea de teste speciale precum: teste de tracțiune video controlată [70] sau de compresiune uniaxială [7, 27]. Chiar în cazul în care comportarea mecanică este diferită pentru fiecare material, se poate descrie curba generală între tensiuni și deformații pentru polimeri (fig. 2.13). Primul tip de comportare este unul vâscoelastic liniar, dependent de timp, care poate fi considerat complet reversibil. Pentru încărcări mici, comportarea materialului este vâscoelastică liniară, în timp ce odată cu creșterea sarcinii aplicate, comportarea devine neliniar progresivă. La limita de curgere, deformațiile devin ireversibile datorită faptului că tensiunile depășesc limita

de plasticitate, ducând la o evoluție structurală a materialului cu rezistență scăzută (înmuiere). În ultima parte, odată cu creșterea deformațiilor, moleculele materialului se orientează pe direcția solicitării, ducând la o creștere a tensiunilor la deformații mari. Fiind dependentă de temperatură, limita de curgere a polimerilor nu poate fi descrisă folosind criteriile clasice.

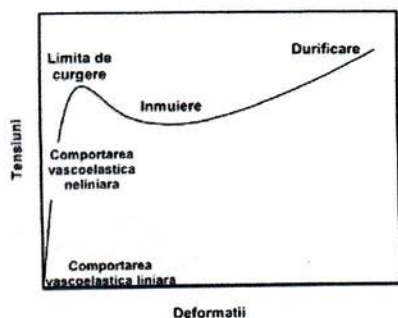


Fig. 2.13. Reprezentarea schematică a comportării mecanice a materialelor polimerice

următoarelor forme multiplicative [67]:

$$F(\varepsilon) = V(\varepsilon) \times C(\varepsilon) \times H(\varepsilon) \quad (2.36)$$

în care:  $V(\varepsilon)$  corespunde stării de tranziție la limita elastică;

$C(\varepsilon)$  corespunde vârfului maxim al curbei tensiune-deformație;

$H(\varepsilon)$  este o funcție care desemnează durificarea la deformații mari.

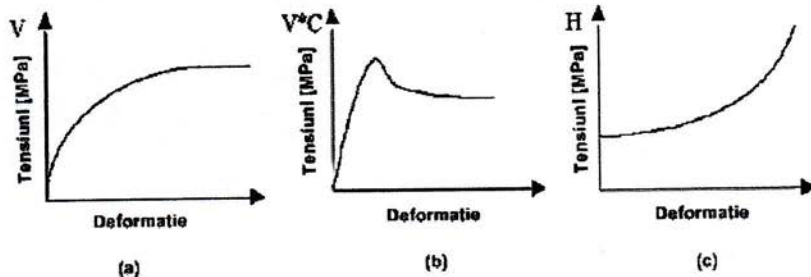


Fig. 2.14. Evoluția caracteristică a diferiților termeni utilizați în legea lui G'Sell - Jonas [25]

Unul dintre modelele cele mai interesante este cel propus de G'Sell și Jonas (1979) a cărui validitate a fost demonstrată de mai multe ori [68, 69, 76]. Această relație conține un termen al limitei de elasticitate, un termen pentru limita de curgere și un termen care desemnează durificarea structurală. Cu alte cuvinte, este separată deformația și viteza de deformare cu ajutorul

## 2.8. Identificarea parametrilor legii de comportare mecanică

Pentru descrierea comportării reologice a celor două compozite polimerice studiate (PPS + 40% fibre de sticlă și PPS + 10% fibre de carbon + 10% grafit + 10% PTFE) a fost utilizată legea multiplicativă G'Sell-Jonas, de tip vâscoelastoplastic.

### 2.8.1. Materiale, metode și echipamente utilizate

Polifenilen sulfură ca matrice este simbolizată în literatura de specialitate cu acronimul PPS și mai poate fi identificată sub denumirea de sulfură de polifenilen. Aceasta prezintă bune caracteristici mecanice și tribologice precum: tenacitate bună, rezistență la abraziune și degradare,

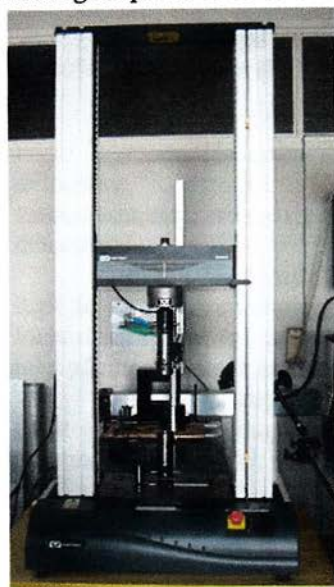


Fig. 2.15. Mașina de încercări la compresiune INSTRON 3369

ceea ce o face utilă în anumite domenii industriale. Pentru acest studiu se vor folosi materiale comerciale (producător Ensinger) [176], sub formă de bare de diametru 20 mm pentru confecționarea epruvetelor pentru testele de compresiune. Matricea PPS este marcă înregistrată Fortron® Ticona și fibrele de sticlă sunt marca Penn Fibre.

În conformitate cu programul experimental impus, testele de compresiune uniaxială au fost efectuate folosind o mașină de încercări INSTRON 3369 din cadrul unității Laboratoire de Genie Civil et Genie Mecanique, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes (fig. 2.15). Mașina de încercări este conectată la un calculator care permite introducerea datelor pentru teste și achiziția de date cu ajutorul programului numit Blue Hill.

Având în vedere faptul că în cazul sistemelor tribologice apar preponderent tensiuni de compresiune, pentru stabilirea unei legi de comportare reologică s-a ales efectuarea de teste la compresiune. Problema, în cazul testelor la compresiune, este legată de geometria epruvetei - în cazul epruvetelor cilindrice, de raportul dintre diametru și înălțime. În acest caz s-au folosit epruvete cilindrice cu înălțimea  $h = 9$  mm și diametrul  $d = 6$  mm, raportul  $h/d = 1,5$  permițând evitarea flambajului epruvetei [76].

Tabel 2.1. Condiții de testare

Condiții de testare	Viteza						Temp [°C]
	Viteza de testare constantă [mm/min]	0,5	5	10	25	50	
PPS GF 40	x	x	x	x	x	x	23
PPS PVX	-	x	x	x	x	x	23

### 2.8.3. Metoda de identificare a parametrilor legii de comportare

Ecuția legii de comportare folosită pentru compozitul ranforsat cu 40% fibre de sticlă (PPS GF 40) este următoarea:

$$\sigma = K(1 - e^{-w \cdot \varepsilon}) \times \dot{\varepsilon}^m \quad (2.50)$$

unde:  $\sigma$  este tensiunea reală [MPa],  $\varepsilon$  – deformația,  $\dot{\varepsilon}$  – viteza de deformare,  $K$  este factorul de scalare, [MPa],  $w$  este coeficient de vâscoelasticitate,  $m$  este un parametru ce descrie sensibilitatea la viteza de deformare.

Pentru compozitul ranforsat cu 40% fibre de sticlă, din ecuația legii de comportare trebuie identificați 3 parametri de material:  $K$ ,  $w$  și  $m$ . Identificarea celor trei parametri se face analitic folosind metoda celor mai mici pătrate și metoda aproximațiilor succesive.

În cazul compozitului PPS aditivat cu 10% fibre de carbon + 10% grafit + 10% PTFE comportarea mecanică prezintă și o zonă de durificare la deformații mari. Astfel, ecuația legii de comportare va fi de forma:

$$\sigma = K(1 - e^{-w \cdot \varepsilon}) e^{h \cdot \varepsilon^n} \dot{\varepsilon}^m \quad (2.54)$$

unde:  $\sigma$  este tensiunea reală [MPa],  $\varepsilon$  – deformația,  $\dot{\varepsilon}$  – viteza de deformare,  $K$  este factorul de scalare, [MPa],  $w$  este coeficient de vâscoelasticitate,  $h$  și  $n$  sunt parametri caracteristici de duritate  $m$  este sensibilitatea la viteza de deformare. Valoarea coeficientului  $n$  a fost 2 conform [67]

Parametrul  $h$  va fi identificat conform schemei din figura 2.19

Tabelul 2.3. Parametrii legii lui G'Sell- Jonas, identificați pentru PPS GF 40 și PPS PVX

Materiale	Parametrii de material ai legii de comportare mecanică G'Sell - Jonas					Q(x)
	m	w	K [MPa]	h	n	
PPS GF 40	0,018	53,3	166,46	--	--	4%
PPS PVX	0,033	30,31	93,74	0,66	2	1%

În tabelul 2.3 sunt prezentați parametri de material identificați conform legii de comportare mecanică G'Sell - Jonas pentru fiecare compozit studiat, în care  $Q(x)$  este funcția obiectiv ce reprezintă eroarea dintre tensiunile reale calculate analitic și cele experimentale.

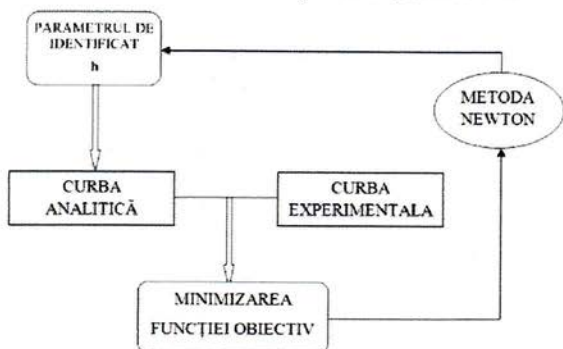


Fig. 2.19. Principiul general al metodei de identificare inversă

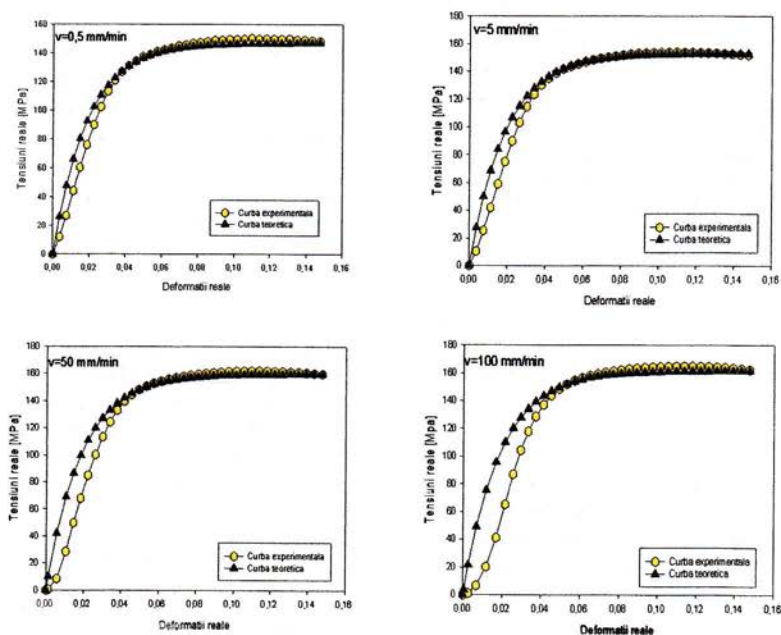


Fig. 2.22. Comparație între tensiunile experimentale - tensiunile teoretice material PPS + 40% fibre de sticlă

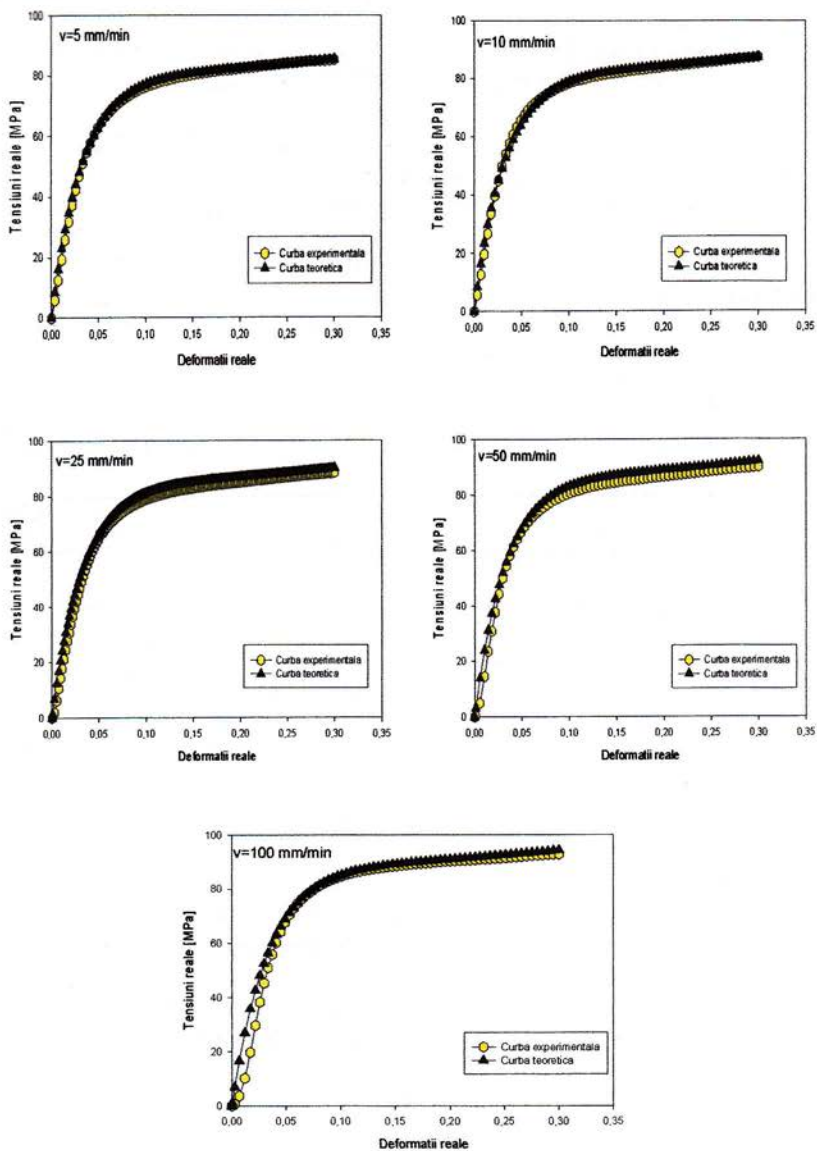


Fig. 2.23. Comparație între tensiunile experimentale - tensiunile teoretice material PPS + 10% fibre de carbon + 10% grafit + 10% PTFE



## CAPITOLUL 3

### COMPORTAREA TRIBOLOGICĂ A COMPOZITELOR CU MATRICE DIN POLIFENILEN SULFURĂ

#### 3.1. Generalități

Compozitele polimerice cu bune caracteristici tribologice trebuie să îndeplinească anumite cerințe, precum valori mici ale parametrilor de uzură și ale coeficientului de frecare [65].

Prin introducerea materialelor de adaos în polimeri s-a avut în vedere diminuarea efectelor negative induse de creșterea temperaturii pieselor în contact, interacțiunea suprafețelor, sarcinile aplicate și mediul de lucru. Particulele și fibrele, în special cele scurte, sunt folosite pentru aditivarea polimerilor, dar se mai pot folosi lubrifianți solizi, precum PTFE și grafit, în vederea scăderii coeficientului de frecare (tabel 3.1) [5, 12, 23, 30, 65, 66, 101, 140].

Tabel 3.1

Materiale	Exemple
Polimeri	PE, PA, PPS, PEEK, PTFE, PI.
Ranfort	Fibre de carbon, de sticlă, aramidice [6, 13, 66, 81, 148, 152]. Metale: Sn, Fe, Cu. Compuși anorganici: SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> [15, 25, 43, 94, 129, 151, 154, 157, 163]. Polimeri: PPS, PEEK, PI, PTFE [133].
Lubrifianți solizi	PTFE, grafit, disulfura de molibden [108, 128].
Aditivi folosiți pentru creșterea conductivității termice	Ag, grafit [66, 90].

#### 3.3. Coeficientul de frecare dinamic

Testele tribologice au fost efectuate pe Tribometrul Universal UMT – 2 (CETR, SUA) folosind un modul de testare știft pe disc care permite măsurarea și vizualizarea parametrilor de comandă și a parametrilor măsuși (viteză de rotație, timp de testare, forța de încărcare, forța de frecare, coeficientul de uzură etc.). Lungimea de alunecare a fost stabilită la 10000 m. Presiunea medie specifică de încărcare a variat în intervalul 0,25 – 0,75 MPa, iar viteza de alunecare a fost stabilită între: 0,25 – 0,75 m/s. Datele necesare testului știft pe disc și caracteristicile analizate în urma testului sunt prezentate în figura 3.4.



Fig. 3.4. Datele de intrare și de ieșire în cazul testului știft-pe-disc

### 3.4. Evoluția coeficientului de frecare în funcție de regimul de testare și de material

În figura 3.6 se prezintă grafic evoluția coeficientului de frecare pentru testele știft din oțel pe disc din material compozit. Compozitul este format dintr-o matrice polimerică – polifenilen sulfură ca matrice cu bune proprietăți mecanice și termice, ranforsată pentru îmbunătățirea proprietăților tribologice cu 10% fibre de carbon + 10% grafit + 10% PTFE. PTFE este utilizat ca material de adaos având în vedere avantajele acestuia ca și lubrifiant solid [12, 13, 15, 34, 81, 148]. Lanțurile moleculare ale PTFE se aliniază pe direcția sollicitării [109]. Coeficientul de frecare poate fi redus prin aditivarea unei matrici polimerice cu PTFE, dar este posibil ca rata de uzură să nu se micșoreze proporțional sau să fie redusă în mai mică măsură [30, 129, 157].

Pentru  $v=0,25$  m/s se constată o creștere a valorii coeficientului de frecare o dată cu creșterea sarcinii medii aplicate (fig. 3.6a). La  $p=0,25$  MPa, valoarea coeficientului de frecare crește pe distanța de 1000 m, după care prezintă un palier până la distanța de 2500 m și, în final, crește brusc la o valoare de 0,20 între 2500 – 3000 m. După 3000 m valoarea coeficientului scade la 0,14 datorită formării pe suprafața de alunecare dintre știft și disc a unei pelicule de grafit cauzată de ruperea legăturilor van der Waals sub acțiunea presiunii. Stabilizarea valorii coeficientului la 0,12 se face între 9000-10000 m.

La  $p=0,75$  MPa evoluția coeficientului de frecare este de creștere bruscă de la 0,16 la 0,24 pe distanța de 1000 m. Între 1000 – 5000 m evoluția este de ușoară scădere datorată apariției unei pelicule de grafit și PTFE formată pe suprafața de alunecare. Spre sfârșitul testului se observă o creștere bruscă a coeficientului de frecare pusă pe seama unei discontinuități apărute în pelicula de grafit formată pe suprafața de alunecare, și pentru că sărăcește stratul superficial în grafit și crește concentrația de fibre [53]. La  $p=0,5$  MPa și  $v=0,75$  m/s se observă o scădere a valorii coeficientului de

frecare la 0,18, aceasta fiind valoarea cea mai mică înregistrată pentru această presiune. Se constată o scădere a coeficientului o dată cu creșterea vitezei de alunecare. PTFE poate fi ușor tras din matrice pentru a forma o pelicula de transfer continuă în alunecarea pe o contrapiesă de oțel. Pentru polimeri și compozitele polimerice pelicula de transfer joacă un rol important în determinarea proprietăților tribologice. Coeficientul de frecare scade o dată cu formarea peliculei de grafit, prin reducerea contactului dintre compozit și știft.

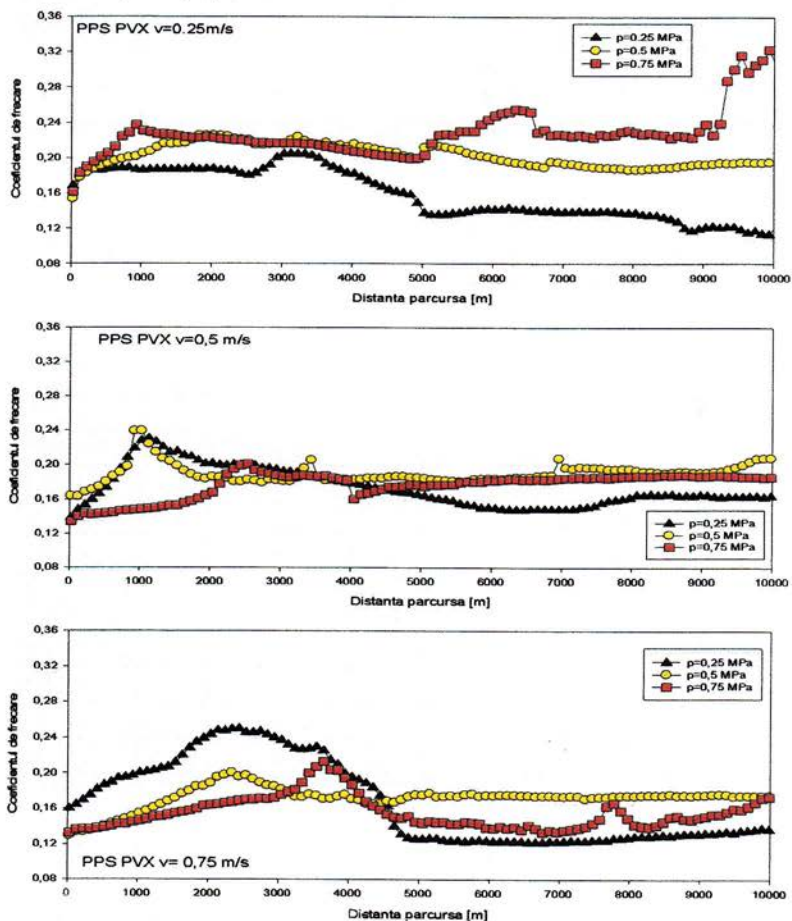
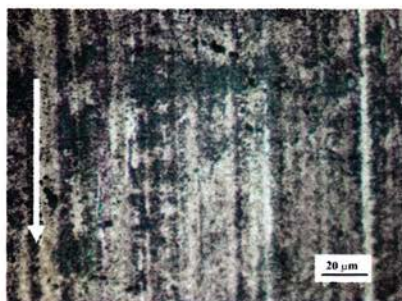
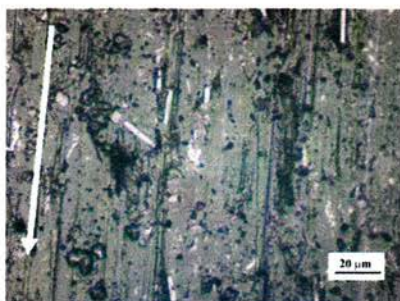


Fig. 3.6. Variația coeficientului de frecare în teste știft (oțel) pe disc (PPS + 10% fibre de carbon + 10% grafit + 10% PTFE), la viteză constantă



a) suprafața discului de compozit

b) suprafața știftului de oțel

Fig. 3.7. Imagine la microscopul optic. Disc din compozit PPS PVX (a) - știft oțel (b) test știft pe disc; parametri de testare  $v=0,5$  m/s,  $p=0,25$  MPa, după 1000 m de alunecare

Odată cu creșterea vitezei de alunecare, se observă scăderea valorii coeficientului de frecare datorită înmuierei PTFE care manifestă o comportare vâscoplastică, și a apariției unei pelicule de transfer la suprafața discului, alunecarea având astfel loc între pelicula de transfer și știftul ce prezintă pe suprafață particule de lubrifianți solizi și mici particule de PPS.

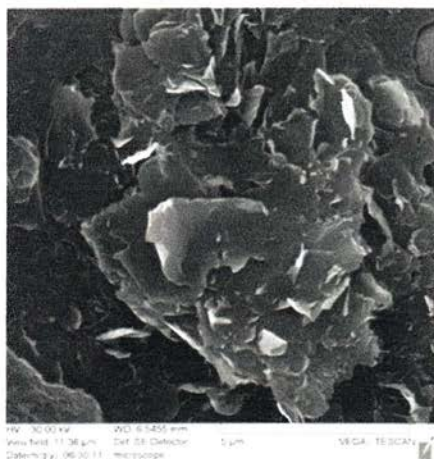


Fig. 3.11. Imaginea SEM a suprafeței discului uzat din compozit PPS PVX; parametrii de testare:  $v=0,75$  m/s,  $p=0,75$  MPa

La sarcini mari, temperatura fiind mai ridicată, se produce o mai bună compactare a stratului superficial. PTFE din compozit se smulge în benzi fine (fig 3.11), care sunt laminare și relaminare, dar rămân parțial pe suprafețe, reducând coeficientul de frecare. Disiparea căldurii este favorizată de prezența grafitului aflat în structura compozitului, astfel că stratul superficial nu este înmuiat, iar PTFE-ul îndeplinește rol de lubrifianț solid.

Datorită frecării se formează particule de uzură prin smulgerea sau tragerea PTFE din stratul superficial,

iar fibrele de carbon se ordonează preponderent pe direcția de alunecare.

Prezența fibrelor de carbon și a grafitului în compozit împiedică formarea unui film subțire și continuu de PTFE care să micșoreze mai mult coeficientul de frecare dar PTFE este mai greu înlăturat din contact din cauza fibrelor. Odată cu creșterea presiunii în cazul compozitului PPS PVX, este favorizată ordonarea fibrelor și particulelor de grafit și PTFE pe direcția de alunecare.

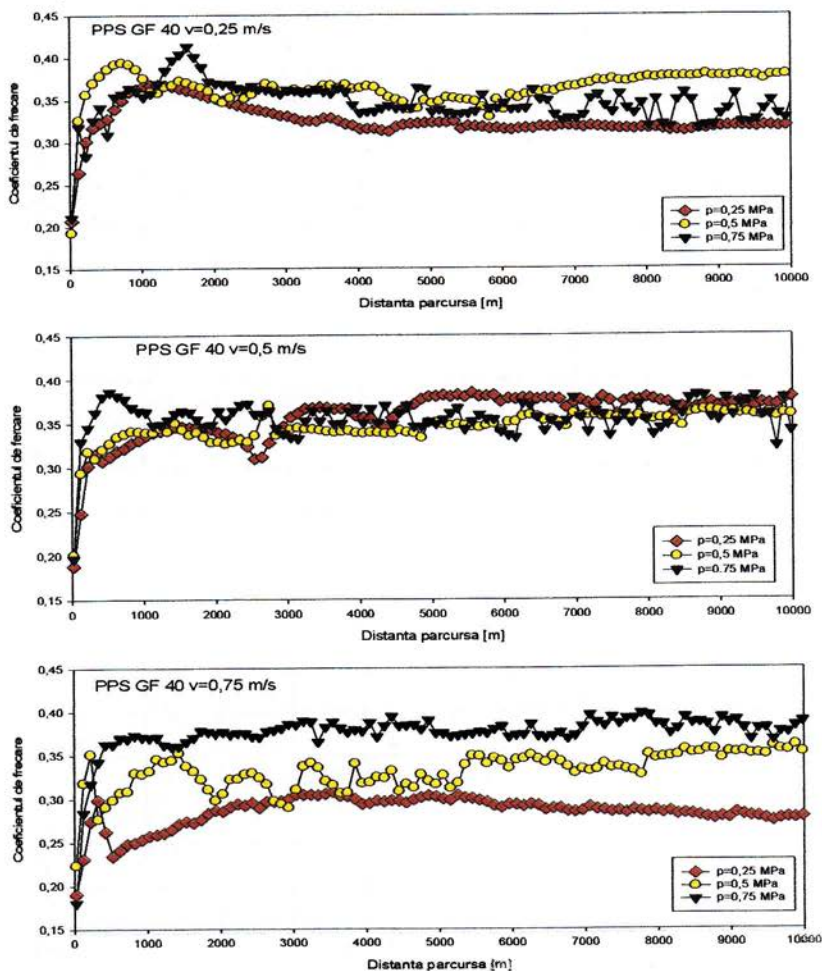


Fig. 3.13. Variația coeficientului de frecare în testul stift (oțel) pe disc (PPS +40% fibre de sticlă) în funcție de distanța parcursă la  $v$ =constant

În figura 3.13 este reprezentată grafic evoluția coeficientului de frecare în testele știft (oțel) pe disc (PPS ranforsat cu 40% fibre de sticlă), pe distanța de alunecare de 10000 m, în regim uscat. Odată cu creșterea presiunii și a vitezei de alunecare, predomină uzura abrazivă. Se formează particule de uzură între cele două suprafețe, care compactându-se și intrând din nou în contact, duc la scăderea coeficientului de frecare până la o stare de echilibru.

Coeficientul de frecare prezintă o tendință unică în funcție de condițiile de presiune, viteză și temperatura generată în contact, în timp ce rata de uzură prezintă regimuri diferite mai mult în funcție de încărcare.

La  $p = 0,25\text{MPa}$  se observă cele mai mici variații ale valorii



Fig. 3.14. Imaginea SEM a suprafeței discului uzat din PPS +40 % fibre de sticlă ( $v = 0,75\text{ m/s}$ ,  $p = 0,75\text{MPa}$ )

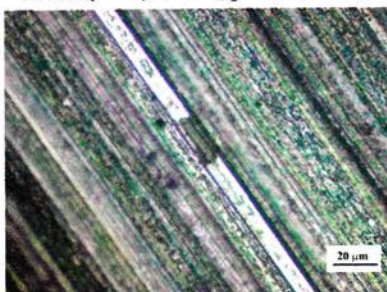


Fig. 3.16. Suprafața știftului cu un fragment de fibra de sticlă blocată între asperitățile știftului (microscopie optică)

coeficientului de frecare și se presupune că la această viteză, predomină uzura de adeziune. Pentru  $v = 0,25\text{ m/s}$  coeficientul de frecare ajunge să se stabilizeze pentru  $p = 0,25\text{MPa}$  la valoarea 0,31 și pentru  $p = 0,5\text{MPa}$  la valoarea 0,38. La  $p = 0,75\text{MPa}$  nu apare o stabilizare a coeficientului de frecare deoarece compozitul se uzează mai repede și rămân prea multe fibre la suprafață, lucru ce se constată pentru toate cele trei viteze de testare. Acesta prezintă variații periodice la intervale neregulate de timp. Prezența variațiilor coeficientului de frecare indică faptul că la suprafața contactului au apărut particule de uzură sau fibre dezgolite care au produs microașchieri la nivelul discului și știftului, punând în evidență uzura abrazivă.

Coeficientul de frecare pentru  $p = 0,75\text{MPa}$  și  $v = 0,5\text{ m/s}$  prezintă variații în intervalul 0,33 - 0,38, dar fără a avea o perioadă constantă. Se observă, o dată cu creșterea presiunii și a vitezei, că pe suprafața de contact se

suprapun mai multe procese de uzură.

La sarcină mică și viteză mare, compozitul cu 40% fibre de sticlă are cea mai mică valoare a coeficientului de frecare. Fibrele de sticlă împiedică transferarea matricei, iar particulele de uzură deja formate, rămân "blocate" între fibre (fig. 3.14). Predominantă este uzura abrazivă manifestată prin microașchiera suprafeței conjugate, formarea și târârea particulelor de uzură rămânând astfel fibrele de sticlă descoperite în contact. Știftul de oțel este deteriorat în urma acestui proces, fibrele de sticlă așchiind suprafața știftului (fig. 3.16).

### 3.5. Corelația între coeficientul de frecare și temperatura înregistrată la contactul dintre știft și disc

Cu ajutorul camerei termografice FLIR ThermoCAM<sup>TM</sup> QuickView, a fost înregistrat câmpul termic în trei puncte de pe disc: primul punct a fost în urma contactului dintre știft și disc (Tuc), al doilea punct a fost punctul de contact dintre știft și disc (Tc), iar ultimul punct a fost punctul diametral opus contactului (Tdc).

Graficul din figura 3.24, pune în evidență o bună corelație a câmpului termic înregistrat cu valorile coeficientului de frecare. Acolo unde coeficientul înregistrează o creștere, temperatura crește corespunzător. Pentru  $p = 0,75\text{MPa}$  și  $v = 0,5\text{m/s}$  temperaturile înregistrate în timpul testelor cresc o dată cu variația coeficientului de frecare. După parcurgerea a 4000 m coeficientul de frecare scade (fig. 3.25), iar până la finalul testului crește lent, stabilizându-se după 8000 m în jurul valorii de 0,19.

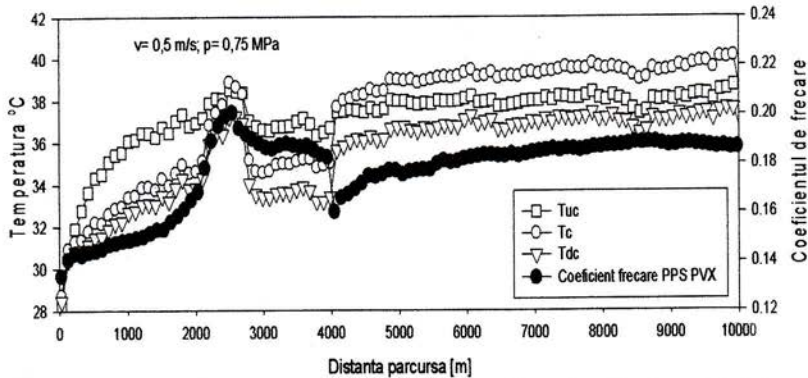


Fig. 3.25. Evoluția temperaturii în trei puncte dezvoltat în timpul testelor știft pe disc (PPS PVX) ( $v=0,5 \text{ m/s}$ ,  $p=0,75\text{MPa}$ )

Odată cu creșterea coeficientului de frecare crește și temperatura din cele trei puncte studiate, evoluția temperaturii având aceeași formă cu variația coeficientului de frecare. Temperatura lângă contact ( $T_c$ ) scade odată cu formarea la suprafață a filmului de grafit, în același timp, datorită aceluiași film de la suprafață scade și coeficientul de frecare.

În cazul compozitului ranforsat cu 40% fibre de sticlă (fig. 3.27) temperatura la contact crește odată cu creșterea presiunii. O diferență mai mare ( $\sim 10^\circ\text{C}$ ) se observă între temperatura lângă contact și temperaturile din spatele contactului, respectiv temperatura înregistrată în punctul diametral opus contactului. Pentru  $p=0,75$  MPa se generează cea mai mare temperatură la  $v=0,75$  m/s. Pe lângă uzura de abraziune și odată cu creșterea temperaturii și a timpului de alunecare, apar pete maronii – ca rezultat al proceselor de oxidare a suprafeței și a modificării compoziției chimice la suprafața compozitului. Se mai observă faptul că odată cu creșterea coeficientului de frecare, crește și temperatura lângă contact.

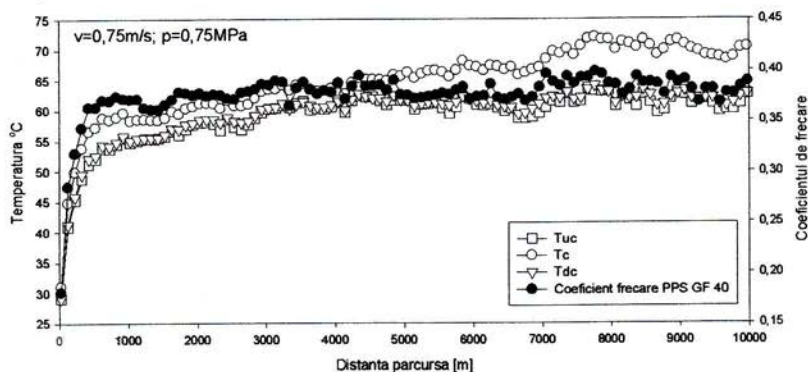


Fig. 3.27. Evoluția temperaturii în trei puncte dezvoltat în timpul testelor știft pe disc (PPS GF 40) pentru  $v=$  constant

După 1000 m parcurși, valoarea temperaturii înregistrată la contactul dintre știft și disc crește cu  $\sim 15^\circ\text{C}$  față de celelalte valori ale punctelor înregistrate (temperatura din spatele contactului și cea diametral opusă contactului). Evoluția câmpului termic este foarte asemănătoare cu evoluția coeficientului de frecare.

### 3.6. Analiza ratei specifice de uzură a compozitelor cu matrice PPS

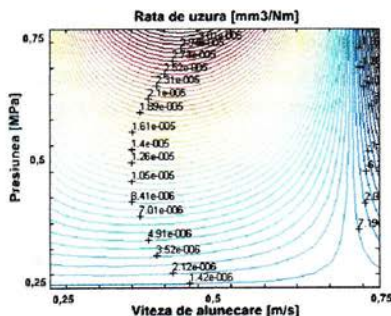
După efectuarea testelor știft (oțel) pe disc (compozit), s-a făcut analiza comportării la uzură a celor două compozite. S-a calculat rata specifică de uzură a discului,  $W_s$  [ $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ], cu relația:



$$W_s = \frac{\Delta m}{\rho d F_N} \quad (3.8)$$

unde:  $\Delta m = m_i - m_f$  este pierderea de masă a discului [g];  $m_i$ ;  $m_f$  - masa inițială a discului respectiv masa finală a discului [g];  $\rho$  - densitatea materialului discului [g/mm<sup>3</sup>];  $d$  - distanța parcursă [m];  $F_N$  - forța normală [N].

Uzura are loc prin pierderea de material prin formarea particulelor de uzură și pierderea de material prin formarea peliculei de transfer.



## CAPITOLUL 4

### ANALIZA CALITĂȚII SUPRAFEȚELOR UZATE A COMPOZITELOR TESTATE PRIN PROFILOMETRIE 3D

#### 4.1. Introducere

Cea mai utilizată metodă pentru analiza topografiei suprafeței este cea cu ajutorul profilometrului cu contact (palpator). Această metodă prezintă însă dezavantajul că prin intrarea în contact cu suprafața, o poate influența local dacă parametrii de măsurare nu sunt selectați adecvat materialului investigat (ex.: forța de apăsare) ca în cazul materialelor moi sau a suprafețelor acoperite cu filme subțiri [89]. Palpatorul poate duce la deteriorarea suprafeței unui material mai moale în timpul măsurătorii.

#### 4.2. Metodologia de măsurare

După realizarea testelor tribologice de alunecare știft-pe-disc, s-au investigat urmele de uzură obținute, atât pe suprafața discurilor din compozit cât și pe suprafața știfturilor din oțel. Pe zona centrală a urmei de uzură s-au realizat măsurători pe suprafețe de  $250 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$  (fig. 4.1). Pentru analiza topografiei suprafețelor s-a folosit Profilometrul PRO 500 3D (cu contact) și un *software* specializat (SPIP) [167].

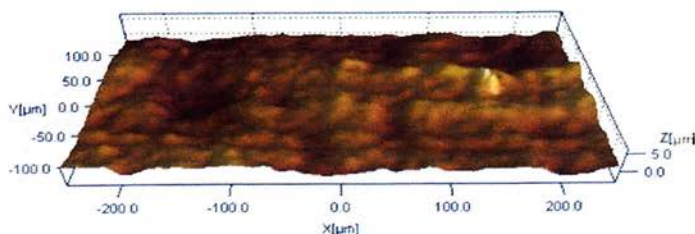


Fig. 4.1. Exemplu de zonă de investigare a texturii suprafeței

Toate înregistrările au fost făcute cu 200 de puncte pe fiecare linie. Pasul dintre linii a fost setat la  $5 \mu\text{m}$ . Parametrii au fost calculați pentru topografia nefiltrată, datorită faptului că poate exista posibilitatea de a pune în evidență valori extreme ale parametrilor de rugozitate [24, 58, 136, 137]. Forța de contact echivalentă a palpatorului s-a stabilit la  $1,56 \times 10^{-4}$  N pentru toate testele. Au fost realizate câte trei măsurători pentru fiecare urmă, iar valorile finale ale parametrilor au fost calculate ca media acestora.

#### 4.4. Influența parametrilor de testare asupra parametrilor 3D ai topografiei suprafeței

##### 4.4.1. Calitatea suprafețelor discurilor din material compozit PPS GF 40

Parametrii de amplitudine  $S_a$ ,  $S_y$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_q$  pentru proba neuzată și probele uzate (material PPS + 40% fibre de sticlă) sunt prezentați în figura 4.9. Din această figură se constată că epruvetele polimerice neuzate, înainte de testare au avut o calitate bună a suprafeței ( $S_a = 0,8 \mu\text{m}$ ,  $S_q = 1,01 \mu\text{m}$ ,  $S_{sk} = -0,5$ ,  $S_{ku} = 3,3$ ,  $S_y = 7,3 \mu\text{m}$ ).

Pentru  $S_a$  și  $S_q$  se observă o tendință de creștere a valorilor odată cu creșterea presiunii de testare, dar pentru  $v=0,25 \text{ m/s}$ ,  $v=0,5 \text{ m/s}$  și  $p=0,5 \text{ MPa}$ ,  $p=0,75 \text{ MPa}$  au valori similare. O creștere mai pronunțată a lui  $S_a$  și  $S_q$  se observă pentru  $v=0,75 \text{ m/s}$ .

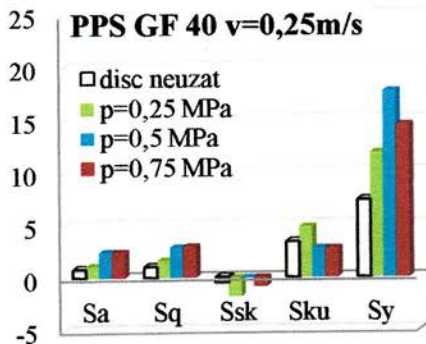


Fig. 4.8. Imagine SEM suprafața uzată a discului de PPS + 40% fibre de sticlă

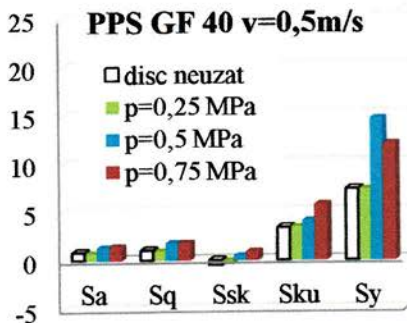
Parametrul  $S_{sk}$  a prezentat la  $v=0,5 \text{ m/s}$  un interval mic de variație pentru sarcina mare aplicată.  $S_{sk}$  tinde spre 0, ceea ce indică faptul că prezintă o distribuție simetrică a vârfulor și golurilor.

Parametrul  $S_{ku}$  nu pare să aibă o comportare dependentă de viteză și nici de sarcină.  $S_{ku}$  prezintă valoarea cea mai mare pentru presiunea cea mai mică ( $p=0,25 \text{ MPa}$ ) și viteza cea mai mare ( $v=0,75 \text{ m/s}$ ), ceea ce înseamnă că această combinație de parametri duce la înrăutățirea calității suprafeței.

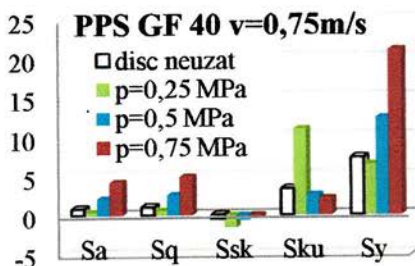
Figura 4.8 prezintă imaginea SEM a suprafeței uzate a discului de PPS + 40% fibre de sticlă (parametri de testare  $p=0,75 \text{ MPa}$  și  $v=0,75 \text{ m/s}$ ). Se poate explica astfel de ce parametrul  $S_y$  prezintă valori mari, deoarece fibrele se înclină pe direcția de alunecare (indicată prin săgeată pe imaginea SEM), dar rămân fixate în matrice, și deci există fibre care rămân înglobate în matrice, dar și material polimeric cu înălțimi mari. Prezența unei suprafețe portante cu goluri este indicată de valori ale parametrului  $S_{sk} < 0$ , observându-se și o distribuție asimetrică a vârfulor pe suprafață.



a)



b)



c)

Fig. 4.9. Influența presiunii asupra parametrilor de amplitudine ai discului neuzat și a discurilor uzate

Pentru discul uzat la  $v=0,5$  m/s,  $p=0,5$  MPa și  $p=0,75$  MPa valoarea parametrului  $S_{sk} > 0$  indică prezența pe suprafață a unor vârfuri. Valoarea mare a lui  $S_{ku}$  pentru  $v=0,75$  m/s și  $p=0,25$ MPa se datorează formării pe suprafață a unor zone relativ izolate, rare dar înalte, datorită faptului că polymerul din compozit nu este comprimat, iar capetele fibrelor de sticlă rămân înglobate în matrice, așa cum se întâmplă la presiuni mai mari.

Parametrul  $S_y$  ce indică înălțimea maximă a asperităților prezintă o evoluție crescătoare odată cu creșterea presiunii pentru  $v=0,75$  m/s. Valoarea maximă a parametrului  $S_y$  ( $\sim 21 \mu\text{m}$ ) s-a înregistrat în cazul testului efectuat la viteza și presiunea maximă, ceea ce indică valoarea cea mai mare a înălțimii asperităților. Pentru  $v=0,25$  m/s și  $0,5$  m/s, valoarea maximă a parametrului  $S_y$  este atinsă pentru  $p=0,5$  MPa.

#### 4.4.2. Calitatea suprafeței discurilor din material compozit PPS PVX, după testare

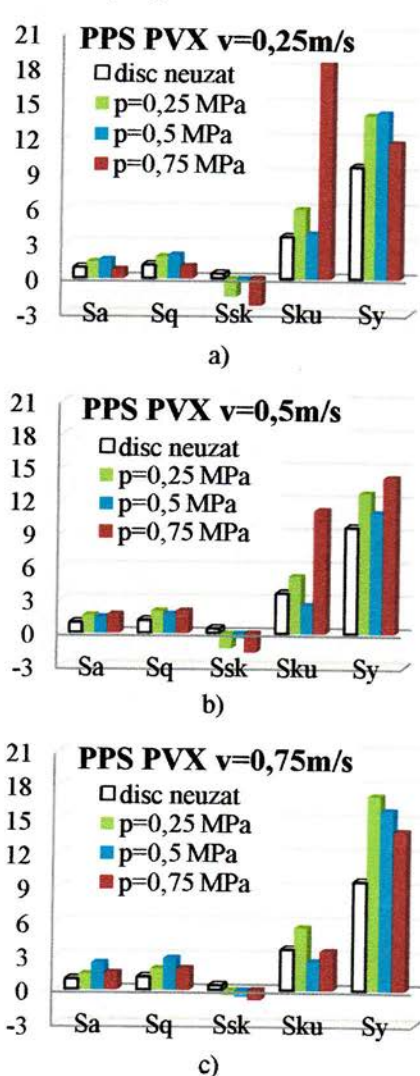


Fig. 4.20. Influența presiunii asupra parametrilor de amplitudine ai discului neuzat și a discurilor uzate

Pentru proba neuzată și probele uzate PPS PVX (material PPS + 10% fibre de carbon + 10% grafit + 10% PTFE), figura 4.20 sunt prezentați în parametrii de amplitudine  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_y$ . Din figurile 4.20 se constată că epruvetele neuzate au avut o calitate bună a suprafeței. ( $S_a = 0,8 \mu\text{m}$ ,  $S_q = 1,1 \mu\text{m}$ ,  $S_{sk} = 0,3$ ,  $S_{ku} = 3,6$ ,  $S_y = 9,5 \mu\text{m}$ ).

Pentru  $S_a$  și  $S_q$  se observă o tendință de creștere a valorilor lor o dată cu creșterea presiunii de testare, dar pentru  $v = 0,25 \text{ m/s}$ ,  $v = 0,75 \text{ m/s}$  și pentru două presiuni  $p = 0,25 \text{ MPa}$ ,  $p = 0,75 \text{ MPa}$ , acești doi parametri au valorile cele mai mici. O creștere mai pronunțată a lui  $S_a$  și  $S_q$  se observă pentru testul cu  $v = 0,5 \text{ m/s}$  și  $p = 0,5 \text{ MPa}$ .

O suprafață ce prezintă vârfuri înalte, indicate de valoarea mai mare decât 0 a parametrului de amplitudine  $S_{sk}$ , este prezentă în cazul discului neuzat. Pentru toate discurile uzate, valoarea parametrului  $S_{sk} < 0$ , ceea ce indică o suprafață portantă cu goluri. Pentru viteze mici ( $v = 0,25 \text{ m/s}$ ,  $v = 0,5 \text{ m/s}$ ) la presiunea  $p = 0,5 \text{ MPa}$ ,  $S_{sk}$  tinde spre 0, ceea ce indică o distribuție uniformă a

vârfurilor și golurilor pe suprafața studiată.

Parametrul  $S_{ku}$  prezintă valoarea cea mai mare pentru presiunea cea mai mare ( $p = 0,75$  MPa) și viteze mici ( $v = 0,25$  m/s,  $v = 0,5$  m/s), ceea ce indică faptul că această combinație de parametri duce la o înrăutățire a calității suprafeței.

Figurile 4.21 și 4.22 prezintă imagini SEM ale suprafeței uzate a discului din PPS PVX (parametrii de testare:  $v = 0,75$  m/s,  $p = 0,75$  MPa). Valorile mari ale parametrului  $S_y$  pentru viteza cea mai mare ( $v = 0,75$  m/s) indică prezența pe suprafață a fibrelor de carbon ce rămân înglobate în matricea polimerică.



Fig. 4.21. Imaginea SEM a zonei uzate de pe discul PPS PVX ( $p = 0,75$  MPa,  $v = 0,75$  m/s) la scara  $50 \mu\text{m}$

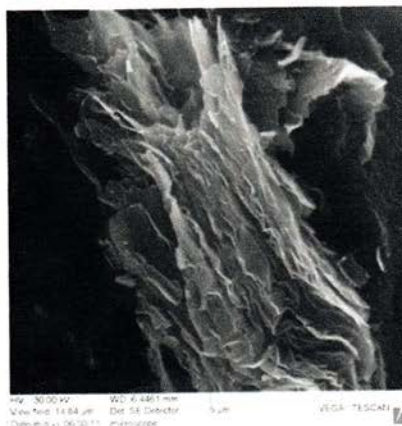


Fig. 4.22. Imaginea SEM a zonei uzate de pe discul PPS PVX ( $p = 0,75$  MPa,  $v = 0,75$  m/s) la scara  $5 \mu\text{m}$

#### 4.5. Discuții

Pentru a compara calitatea suprafețelor uzate în funcție de material s-au trasat graficele din figura 4.32. Simbolurile goale sunt pentru PPS + 40% fibre de sticlă, iar cele pline pentru PPS + 10% fibre de carbon + 10% grafit + 10% PTFE. În abscisă este valoarea parametrului ( $pv$ ). S-a ales acest parametru pentru a putea include pe grafic toate testele efectuate pe fiecare material. În general s-a constatat că materialul PPS PVX are parametri împrăștiați pe intervale mai mici comparativ cu PPS GF 40.

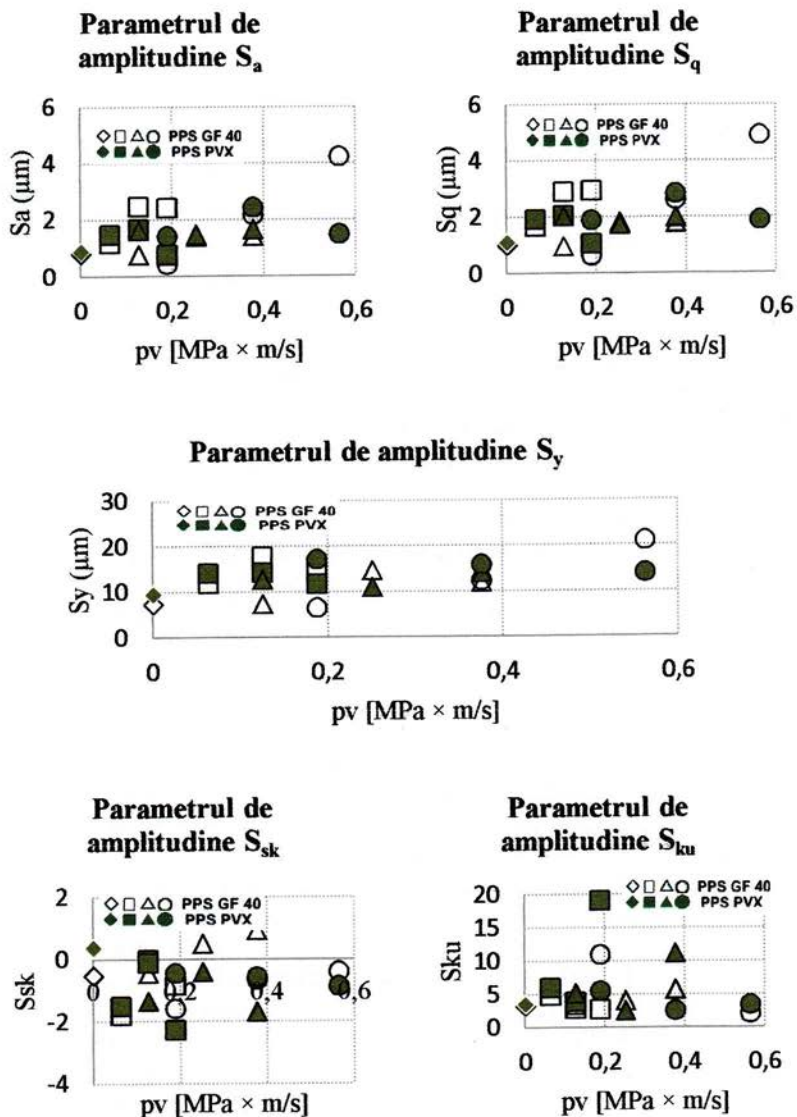


Fig. 4.32. Comparație între parametri de amplitudine pentru materialul PPS +40% fibre de sticlă (PPS GF 40) și materialul PPS+10% fibre de carbon+10% grafit+10% PTFE (PPS PVX) în funcție de produsul  $pv$

## CAPITOLUL 5

### Concluzii finale

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

1. Metodologia experimentală aplicată permite caracterizarea din punct de vedere mecanic și tribologic a compozitelor investigate;
2. După efectuarea testelor mecanice s-a studiat comportarea mecanică a compozitelor în vederea identificării unei legi de comportare reologică;
3. Pe baza legii de comportare mecanică la compresiune s-au identificat parametrii de material, sub forma unui singur set pentru fiecare dintre cele două compozite, PPS GF 40 și PPS PVX, valabili pentru viteze de deformare cuprinse între  $1 \times 10^{-3}$  –  $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ;
4. Materialul ranforsat cu 40% fibre de sticlă prezintă cea mai bună comportare mecanică dintre materialele studiate; acest compozit suportă tensiuni mai mari cu 75% față de compozitul PPS PVX;
5. Compozitul PPS GF 40 prezintă o comportare vâscoelastică evidentă;
6. Comportarea mecanică a compozitului PPS PVX prezintă, după limita de curgere, o zonă de ecrusare care nu apare în cazul compozitului ranforsat cu fibre de sticlă;
7. În urma analizei comportării mecanice la compresiune s-a constatat că PPS GF 40 suportă cele mai mari tensiuni;
8. Compozitele studiate prezintă bune proprietăți mecanice și tribologice; literatura de specialitate consultată nu oferă încă date, majoritatea studiilor efectuate până în prezent folosind alte materiale de adaos pentru matricea de polifenilen sulfură;
9. Pentru fiecare regim de lucru s-au identificat procesele tribologice din stratul superficial, acestea fiind specifice pentru fiecare compozit datorită faptului că aditivii folosiți induc procese de uzură diferite; s-a observat o uzură adezivă în cazul compozitului PPS PVX și o uzură abrazivă evidentă în cazul compozitului ranforsat cu fibre de sticlă;
10. Compozitul ranforsat cu 40% fibre de sticlă prezintă suprafețe uzate ruгоase și un caracter abraziv la viteze mari de alunecare; pentru acest compozit, creșterea vitezei de alunecare are un efect evident asupra comportării tribologice;



11. În cazul compozitului PPS PVX, în timpul testelor tribologice, pe suprafața de alunecare se formează un film subțire de grafit și PTFE, care produce scăderea coeficientului de frecare și a ratei specifice de uzură.
12. Monitorizarea termografică a contactului dintre știft și disc pe durata testelor a arătat faptul că temperatura lângă contact nu atinge temperatura de înmuiere pentru materialele studiate;
13. S-a constatat o corelație între tendința de evoluție a temperaturilor și a coeficientului de frecare;
14. S-a discutat corelația observată între viteza de alunecare și evoluția diferențelor de temperatură; odată cu creșterea vitezei crește și temperatura de lângă contact, iar în cazul compozitului ranforsat cu fibre de sticlă s-au înregistrat temperaturi mai mari decât în cazul compozitului PPS PVX.
15. Rata specifică de uzură este cu un ordin de mărime mai mică pentru PPS PVX față de PPS GF 40, iar aceste rezultate recomandă materialul PPS PVX pentru aplicații cu regimuri apropiate celor din cadrul testelor ( $v= 0,25...0,75$  m/s și  $p= 0,25...0,75$  MPa);
16. În urma investigării stratului superficial pentru compozitul aditivat cu 40% fibre de sticlă, s-a observat existența fibrelor de sticlă rupte sau descoperite pe suprafața uzată, ceea ce reprezintă un factor important pentru producerea uzurii de tip abraziv;
17. Materialele studiate prezintă comportări diferite din punct de vedere al formării particulelor de uzură și dezvoltării de material transferat, în funcție de regimul de viteză și presiune;
18. Studiul parametrilor 3D pentru suprafețele uzate a permis stabilirea influenței regimului de testare asupra calității suprafețelor uzate;
19. În urma testelor experimentale efectuate s-a stabilit faptul că materialele polimerice cu matrice de polifenilen sulfură și adaos de fibre de sticlă, respectiv fibre de carbon, grafit și PTFE pot fi recomandate pentru aplicații în condiții severe de lucru.

### Contribuții personale

1. Elaborarea și punerea în practică a unei metodologii experimentale de testare mecanică și tribologică pentru a evidenția influența materialelor de adaos și a parametrilor de testare;

2. Stabilirea unei legi fenomenologice care descrie comportarea mecanică a compozitelor studiate;
3. Identificarea prin metoda inversă a unui set de parametri ai legii de comportare mecanică, pentru fiecare compozit, valabil la viteze de deformare cuprinse între  $1 \times 10^{-3}$ – $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ;
4. Studiul influenței materialelor de adaos asupra comportării mecanice și tribologice a compozitelor analizate;
5. Studiul evoluției coeficientului de frecare în funcție de regimul de testare și de materialul de aditivare folosit;
6. Utilizarea modelului de evoluție a coeficientului de frecare în funcție de distanța de alunecare propus de Czichos pentru validarea rezultatelor experimentale;
7. Identificarea și explicarea fenomenelor apărute în stratul superficial în urma testelor tribologice, pe baza imaginilor de microscopie optică și electronică;
8. Utilizarea profilometriei 3D în vederea explicării proceselor apărute în stratul superficial al compozitelor;
9. Corelarea și interpretarea comportării tribologice cu ajutorul termografiei în infraroșu.

### **Direcții de cercetare**

Programul experimental propus a permis studiul comportării mecanice și tribologice a compozitelor cu matrice de polifenilen sulfură. Având în vedere faptul că materialele compozite cu matrice polimerică sunt din ce în ce mai folosite în domeniul industriei, se impune continuarea studiilor asupra acestor compozite în următoarele direcții:

- testarea tribologică a compozitelor la viteze și presiuni mai mari față de cele utilizate în prezenta lucrare, peste 0,75 m/s și peste 0,75 MPa;
- creșterea distanței de alunecare pentru compozitele care nu au prezentat o stabilizare a valorii coeficientului de frecare;
- construirea pe baza experimentale a unor rețele neuronale pentru optimizarea alegerii cuplului de materiale în funcție de condițiile de funcționare sau pentru predicția unor valori ale parametrilor funcționali.

## Bibliografie

1. Amoedo, J., and D. Lee. 1992. Modeling the uniaxial rate and temperature dependent behavior of amorphous and semicrystalline polymers. *Polymer Engineering & Science* 32: 1055-1065.
2. Andersson, S., A. Soderberg, and S. Bjorklund. 2007. Friction models for sliding dry, boundary and mixed lubricated contacts. *Tribology International* 40: 580-587.
3. Andersson, S., A. Soderberg, and U. Olofsson. 2008. A random wear model for the interaction between a rough and a smooth surface. *Wear* 264: 763-769.
4. Andrei, G., L. Deleanu, L. Maftai, G. Birsan, and A. Besnea. 2010. On Wear Behaviour of a Composite Class with Micro-Nano Adding Particles and PA Matrix. *Materiale Plastice* 47: 356-363.
5. Andrei, G., D. Dima, and L. Andrei. 2006. Lightweight magnetic composites for aircraft applications. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 8: 726-730.
6. Andrei, G., Dima, D., Birsan, I., et. al. 2009. Effect of Ferrite Particles on Mechanical Behaviour of Glass Fibers Reinforced Polymer Composite. *Materiale Plastice* 46: 284-287.
7. Arruda, E. M., and M. C. Boyce. 1993. Evolution of plastic anisotropy in amorphous polymers during finite straining. *International Journal of Plasticity* 9: 697-720.
8. Asthana, R., A. Kumar, and N. B. Dahotre. 2006. *Materials processing and manufacturing science*. Elsevier.
9. Avalle, M., M. Peroni, and A. Scattina. 2010. Mechanical model of behaviour of the behaviour of plastic materials: influence of time and temperature. *Latin American Journal of Solids and Structures*: 41-61
10. Bahadur, S. 2000. *The development of transfer layers and their role in polymer tribology*. *Wear* 245: 92-99.
11. Bahadur, S. 1991. Mechanical and Tribological Behavior of Polyester Reinforced With Short Fibers of Carbon and Aramid. *Lubrication Engineering* 47: 661-667.
12. Bahadur, S., and D. Gong. 1992. The action of fillers in the modification of the tribological behavior of polymers. *Wear* 158: 41-59.
13. Bahadur, S., and D. Gong. 1992. Formulation of the model for optimal proportion of filler in polymer for abrasive wear resistance. *Wear* 157: 229-243.
14. Bahadur, S., and D. Gong. 1992. The role of copper compounds as fillers in the transfer and wear behavior of polyetheretherketone. *Wear* 154: 151-165.
15. Bahadur, S., D. Gong, and J. W. Anderegg. 1993. The investigation of the action of fillers by XPS studies of the transfer films of PEEK and its composites containing CuS and CuF<sub>2</sub>. *Wear* 160: 131-138.
16. Bartenev, G. M., V. V. Lavrentev, L. H. Lee, and K. C. Ludema. 1981. *Friction and wear of polymers*. Elsevier Scientific Pub. Co.
17. Besnea, A. 2009. Caracterisation tribologique des composite polymeres avec de spheres verre micro. *Journee des doctorants INSA de Rennes*.

18. **Besnea, A., D. Trufașu, G. Andrei, and L. Deleanu.** 2011. Wear, friction and temperature monitoring of polyphenylene sulphide composites under dry sliding regime. *Annals of DAAAM & Proceedings of the 22th DAAAM International World Symposium* 22: 1277-1278.
19. **Besnea, A., D. Trufașu, G. Andrei, P. Alexandru, and L. Deleanu.** 2011. The influence of sliding speed on the friction coefficient of polyphenylene sulphide matrix composites under dry sliding regime. *The Annals of "DUNĂREA DE JOS" University of Galați, Fascicle VIII, Tribology XVII*, 2: 38-42.
20. **Bhushan, B.** 2002. *Introduction to tribology.* John Wiley & Sons.
21. **Bhushan, B.** 2001. *Modern tribology handbook.* CRC Press.
22. **Billon, N.** 2003. Effet de couplage thermomécanique dans la caractérisation du comportement de polymères solides. 16ème Congrès Français de Mécanique.
23. **Blanchet, T. A., F. E. Kennedy, and D. T. Jayne.** 1993. XPS Analysis of the Effect of Fillers on PTFE Transfer Film Development in Sliding Contacts. *Tribology Transactions* 36: 535-544.
24. **Blunt, L., and X. Jiang.** 2003. Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards "surfstand". Kogan Page Science.
25. **Bohm, H., S. Betz, and A. Ball.** 1990. The wear resistance of polymers. *Tribology International* 23: 399-406.
26. **Bourban, P. E.** 2004. *Materiaux composites a matrice organique: constituants, procedes, proprietes.* Presses polytechniques et universitaires romandes.
27. **Boyce, M. C., E. M. Arruda, and R. Jayachandran.** 1994. The large strain compression, tension, and simple shear of polycarbonate. *Polymer Engineering & Science* 34: 716-725.
28. **Boyce, M. C., D. M. Parks, and A. S. Argon.** 1988. Large inelastic deformation of glassy polymers. part I: rate dependent constitutive model. *Mechanics of Materials* 7: 15-33.
29. **Brinson, H. F., and L. C. Brinson.** 2008. *Polymer engineering science and viscoelasticity: an introduction.* Springer.
30. **Briscoe, B. J., Y. Lin Heng, and T. A. Stolarski.** 1986. The friction and wear of poly(tetrafluoroethylene)-poly (etheretherketone) composites: An initial appraisal of the optimum composition. *Wear* 108: 357-374.
31. **Brown, R.** 2002. *Handbook of polymer testing: short-term mechanical tests.* Rapra Technology.
32. **Brydson, J. A.** 1999. *Plastics materials.* Butterworth-Heinemann.
33. **Buckley, C. P., and D. C. Jones.** 1995. Glass-rubber constitutive model for amorphous polymers near the glass transition. *Polymer* 36: 3301-3312.
34. **Burke, D., and I. Sherrington.** 1998. Evolution of the Frictional Characteristics of Commercially Available Bonded Solid Lubricants. *Proc. of the 8 International Conference on Tribology, NORDTRIB'98*: 383-395.
35. **Callister, W. D.** 1999. *Material Science and Engineering: An Introduction.* John Wiley & Sons Inc.
36. **Callister, W. D.** 2007. *Materials science and engineering: an introduction.* John Wiley & Sons.

37. Callister, W. D. 2003. *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley & Sons.
38. Campo, E. A. 2008. *Selection of polymeric materials: how to select design properties from different standards*. William Andrew.
39. Cangemi, L., and Y. Meimon. 2001. Un modele biphasique pour le comportement mecanique des polymeres semi-cristallins. *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP* 56: 555-580.
40. Cantizano, A., A. Carnicero, and G. Zavarise. 2002. Numerical simulation of wear-mechanism maps. *Computational Materials Science* 25: 54-60.
41. Carraher, C. E., and R. B. Seymour. 2003. *Giant molecules: essential materials for everyday living and problem solving*. Wiley.
42. Chanda, M., and S. K. Roy. 2006. *Plastics technology handbook*. CRC Press/Taylor & Francis Group.
43. Chang, L., and Z. Zhang. 2006. Tribological properties of epoxy nanocomposites: Part II. A combinative effect of short carbon fibre with nano-TiO<sub>2</sub>. *Wear* 260: 869-878.
44. Cheremisinoff, N. P. 1998. *Advanced polymer processing operations*. Noyes Publications.
45. Cho, M. H., and S. Bahadur. 2005. Study of the tribological synergistic effects in nano CuO-filled and fiber-reinforced polyphenylene sulfide composites. *Wear* 258: 835-845.
46. Cho, M. H., S. Bahadur, and J. W. Anderegg. 2006. Design of experiments approach to the study of tribological performance of Cu-concentrate-filled PPS composites. *Tribology International* 39: 1436-1446.
47. Cho, M. H., S. Bahadur, and A. K. Pogosian. 2006. Observations on the effectiveness of some surface treatments of mineral particles and inorganic compounds from Armenia as the fillers in polyphenylene sulfide for tribological performance. *Tribology International* 39: 249-260.
48. Chung, D. 2002. Review Graphite. *Journal of Materials Science* 37: 1475-1489.
49. Czichos, H. 1978. *Tribology: a systems approach to the science and technology of friction, lubrication, and wear*. Elsevier Scientific Pub. Co.
50. Czichos, H., K. H. Habig, E. Santner, and M. Woydt. 2010. *Tribologie-handbuch: Reibung und Verschleib*. Vieweg.
51. Czichos, H., T. Saito, L. M. Smith, and L. E. Smith. 2011. *Springer Handbook of Metrology and Testing*. Springer.
52. Czichos, H., T. Saito, L. R. Smith, and L. Smith. 2006. *Springer handbook of materials measurement methods*. Springer.
53. Deleanu, L. 1999. Contribuții la stadiul stratului superficial al compozitelor cu matrice de politetrafluoroetilenă pe tribomodele de alunecare. Teza de doctorat.
54. Deleanu, L., G. Andrei, S. Ciortan, A. Cantaragiu, A. Besnea, C. Trufașu, and G. Podaru. 2009. Statistical assessment of surface quality using 3D profilometry parameters. The Annals of „Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle VIII, *Tribology*: 20-30.

55. **Deleanu, L., Laura Maftei, Gabriel Andrei, Alina Cantaragiu and Aida Besnea.** 2009. Processes characterising tribological behaviour of polymeric composites with micro glass spheres. International Conference on Polymers Processing in Engineering PPE 2009. 2: 102-109.
56. Deleanu, L., I. G. Bîrsan, A. Andrei, M. Rîpă, and N. Diaconu. 2008. Compozite PTFE și lubrifierea cu apă. II. Caracterizarea suprafețelor. Revista de Materiale Plastice 4: 332-338.
57. Deli, G., X. Qunji, and W. Hongli. 1991. Physical models of adhesive wear of polytetrafluoroethylene and its composites. Wear 147: 9-24.
58. Dong, W. P., P. J. Sullivan, and K. J. Stout. 1994. Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography: III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties. Wear 178: 29-43.
59. Dong, W. P., P. J. Sullivan, and K. J. Stout. 1993. Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography II: Statistical properties of parameter variation. Wear 167: 9-21.
60. Duan, Y., A. Saigal, R. Greif, and M. A. Zimmerman. 2003. Modeling multiaxial impact behavior of a glassy polymer. Materials Research Innovations 7: 10-18.
61. Duan, Y., A. Saigal, R. Greif, and M. A. Zimmerman. 2001. A uniform phenomenological constitutive model for glassy and semicrystalline polymers. Polymer Engineering & Science 41: 1322-1328.
62. Edmonds J, T., and W. Hill H. 1967. U.S. Pat. 3,354,129.
63. Erner, A. 2005. Etude experimentale du thermoformage assiste par poincon d'un mélange de polystyrenes. PhD thesis Ecole des mines de Paris.
64. Fisher, J., D. Dowson, H. Hamdzah, and H. L. Lee. 1994. The effect of sliding velocity on the friction and wear of UHMWPE for use in total artificial joints. Wear 175: 219-225.
65. Friedrich, K. 1993. Advances in composite tribology. Elsevier.
66. Friedrich, K., Z. Lu, and A. M. Hager. 1995. Recent advances in polymer composites tribology. Wear 190: 139-144.
67. G'Sell, C. 1988. Instabilites de deformation pendant l'etirage des polymeres solides. Journal de physique 23: 1085-1101.
68. G'Sell, C., A. Dahoun, J. M. Hiver, and C. Poinsot. 1995. Creep and yield behaviour of semi crystalline polyethylene in uniaxial tension. IUTAM symposium on micromechanics of plasticity and damage in multiphase materials.
69. G'Sell, C., V. Favier, J. M. Hiver, A. Dahoun, M. J. Philippe, and G. R. Canova. 1997. Microstructure transformation and stress-strain behavior of isotactic polypropylene under large plastic deformation. Polymer Engineering & Science 37: 1702-1711.
70. G'Sell, C., J. M. Hiver, A. Dahoun, and A. Souahi. 1992. Video-controlled tensile testing of polymers and metals beyond the necking point. Journal of Materials Science 27: 5031-5039.
71. G'Sell, C., and J. J. Jonas. 1981. Yield and transient effects during the plastic deformation of solid polymers. Journal of Materials Science 16: 1956-1974.

72. Gadelmawla, E. S., M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa, and H. H. Soliman. 2002. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology* 123: 133-145.
73. Gyurova, L. A., and K. Friedrich. 2011. Artificial neural networks for predicting sliding friction and wear properties of polyphenylene sulfide composites. *Tribology International* 44: 603-609.
74. Han, C. D. 2007. *Rheology and processing of polymeric materials*. Oxford University Press.
75. Harper, C. A. 2002. *Handbook of plastics, elastomers, and composites*. McGraw-Hill.
76. Haudin, J. M., and C. G'Sell. 1995. *Introduction à la mécanique des polymères*. Institut National polytechnique de Lorraine Nancy, France.
77. Haverstick, J. K., and T. C. Ovaert. 1995. Polymer/Metal Conformal Sliding Contact With Forced Convective Cooling. *Journal of Tribology* 117: 1-8.
78. Haward, R. N., and G. Thackray. 1968. The Use of a Mathematical Model to Describe Isothermal Stress-Strain Curves in Glassy Thermoplastics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 302: 453-472.
79. Hegadekatte, V., N. Huber, and O. Kraft. 2005. Finite element based simulation of dry sliding wear. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 13: 57-75.
80. Hegadekatte, V., S. Kurzenhuser, N. Huber, and O. Kraft. 2008. A predictive modeling scheme for wear in tribometers. *Tribology International* 41: 1020-1031.
81. Herman, H. 1979. *Treatise on materials science and technology*. Academic Press.
82. Herman, M. F. 2003. *Encyclopedia of polymer science and technology*, third edition.
83. Hmida-Maamar, S., F. Schmidt, L. Robert, V. Velay, and D. Mercier. 2006. Identification de parametres de comportement de membranes en polymeres durant le procede de soufflage. *Mater. Tech.* 94: 371-378.
84. Iliuc, I. 1980. *Tribology of thin layers*.
85. Jang, J., and H. S. Kim. 1996. Performance improvement of glass fiber-poly(phenylene sulfide) composite. *Journal of Applied Polymer Science* 60: 2297-2306.
86. Jang, J., and C. Lee. 1998. Performance improvement of GF/CF functionally gradient hybrid composite. *Polymer Testing* 17: 383-394.
87. Jang, S., and J. Tichy. 1995. Rheological Models of Thin Film EHL Contacts. *Transactions of the ASME, Journal of Tribology* 117: 22-28.
88. Jenkins, A. D. 1972. *Polymer science: A materials science handbook*. North-Holland Pub. Co.
89. Jolic, K. I., C. R. Nagarajah, and W. Thompson. 1994. Non-contact, optically based measurement of surface roughness of ceramics. *Measurement Science and Technology* 5: 671-685.

90. Kang, S.-C., and D.-W. Chung. 2003. Improvement of frictional properties and abrasive wear resistance of nylon/graphite composite by oil impregnation. *Wear* 254: 103-110.
91. Kausch, H. H., N. Heymans, C. J. Plummer, and P. Decroly. 2001. *Materiaux Polymeres: Proprietes Mecaniques et Physiques*. Presses polytechniques et universitaires romandes.
92. Kjeldsteen, P. 1997. Tribological investigations of P/M Stainless steels mixed with HXC23 against  $Al_2O_3$  & SiC. Danfoss Research Report MUP2
93. Kjeldsteen, P. 1994. Wear resistance of PM materials and its dependency on surface topography. *Powder Metallurgy World Congress* 1: 657-660.
94. Kobatake, S., S. Nakazawa, K. Nagata, S. Miyazawa, and Y. Kawakubo. 2005. Pin-on-disk wear study on thin-film disks for contact recording systems. *Microsystem Technologies* 11: 921-924.
95. Kostetsky, B. I. 1992. The structural-energetic concept in the theory of friction and wear (synergism and self-organization). *Wear* 159: 1-15.
96. Kutz, M. 2002. *Handbook of materials selection*. J. Wiley.
97. Lauro, F., and J. Oudin. 2003. Static and dynamic behaviour of a polypropylene for bumpers. *International Journal of Crashworthiness* 8: 553-558.
98. Lin, Y. H. 2003. *Polymer viscoelasticity: basics, molecular theories, and experiments*. World Scientific.
99. Lopez, L. C., and G. L. Wilkes. 1989. Poly(p-Phenylene Sulfide) an Overview of an Important Engineering Thermoplastic. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews* 29: 83-151.
100. Lu, X.-C., S.-Z. Wen, J. Tong, Y.-T. Chen, and L.-Q. Ren. 1996. Wettability, soil adhesion, abrasion and friction wear of PTFE (+ PPS) +  $Al_2O_3$  composites. *Wear* 193: 48-55.
101. Lu, Z. P., and K. Friedrich. 1995. On sliding friction and wear of PEEK and its composites. *Wear* 181-183, Part 2: 624-631.
102. Mai, K., Z. Mei, J. Xu, and H. Zeng. 1998. Effect of high-performance polymers on crystallization and multiple melting behavior of poly(phenylene sulfide). *Journal of Applied Polymer Science* 69: 637-644.
103. Mao, K., Y. Sun, and T. Bell. 1996. A Numerical Model for the Dry Sliding Contact of Layered Elastic Bodies with Rough Surfaces. *Tribology Transactions* 39: 416-424.
104. McKeen, L. W. 2008. *The effect of temperature and other factors on plastics and elastomers*. *Plastics Design Library/William Andrew*.
105. McKeen, L. W. 2009. *Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers, 2nd Edition*. William Andrew.
106. Menczel, J. D., and G. L. Collins. 1992. Thermal analysis of poly(phenylene sulfide) polymers. I: Thermal characterization of PPS polymers of different molecular weights. *Polymer Engineering & Science* 32: 1264-1269.
107. Mihailidis, A., and V. Bakolas. 1999. Numerical Simulation of 3-D Rough Surfaces. *Proc. of The 3th Inter. Conf. of Tribology, Balkantrib'99* 1: 11-20.



108. Miyakawa, Y., and S. Mizuno. 1990. Study on Rolling-Sliding Friction and Wear Properties of Solid Lubricants. I. Rolling-Sliding Friction Properties of Unlubricated Steels. *Journal of Japanese Society of Tribologists* 35: 899-906.
109. Moore, D. F. 1975. Principles and applications of tribology. Pergamon Press.
110. Morgan, P. 2005. Carbon fibers and their composites. Taylor & Francis.
111. Moufki, A., A. Molinari, and D. Dudzinski. 1998. Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 46: 2103-2138.
112. Moura, R. T., A. H. Clausen, E. Fagerholt, M. Alves, and M. Langseth. 2010. Impact on HDPE and PVC plates - experimental tests and numerical simulations. *International Journal of Impact Engineering* 37: 580-598.
113. Myshkin, N. K., M. I. Petrokovets, and S. A. Chizhik. 1998. Simulation of real contact in tribology. *Tribology International* 31: 79-86.
114. Myshkin, N. K., M. I. Petrokovets, and A. V. Kovalev. 2005. Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. *Tribology International* 38: 910-921.
115. Perez, J. 2001. *Materiaux non cristallins et science du desordre*. Presses polytechniques et universitaires romandes.
116. Podra, P., and S. Andersson. 1999. Finite element analysis wear simulation of a conical spinning contact considering surface topography. *Wear* 224: 13-21.
117. Podra, P., and S. Andersson. 1999. Simulating sliding wear with finite element method. *Tribology International* 32: 71-81.
118. Popescu-Pietriș, V., and S. Socoliuc. 1994. *Materiale sintetice fluorurate, copolimeri ai tetrafluor-etilenei*. Editura Tehnică, București.
119. Prostrednik, D., and P. H. Osanna. 1998. The Abbott curve well known in metrology but not on technical drawings. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38: 741-745.
120. Rajan, C. R., S. Ponrathnam, and V. M. Nadkarni. 1986. Poly(phenylene sulfide): Polymerization kinetics and characterization. *Journal of Applied Polymer Science* 32: 4479-4490.
121. Ramani, K., and A. Vaidyanathan. 1995. Finite Element Analysis of Effective Thermal Conductivity of Filled Polymeric Composites. *Journal of Composites Materials* 29: 1725-1739.
122. Rault, J. 2002. *Les polymeres solides: amorphes, elastomeres, semi-cristallins: proprietes microscopiques et macroscopiques*. Cepadues.
123. Ravikiran, A. 1998. Effect of pin specimen contact length in the sliding direction on tribological results of pin-on-disc tests. *Tribology Letters* 4: 49-58.
124. Riande, E. 2000. *Polymer viscoelasticity: stress and strain in practice*. Marcel Dekker.
125. Rudin, A. 1999. *The elements of polymer science and engineering: an introductory text and reference for engineers and chemists*. Academic Press.
126. Ruiz De Gauna, B. E., M. Gaztelumendi, and J. Nazábal. 2000. Structure and mechanical properties of fast cooled and annealed poly(phenylene sulfide)/Vectra A blends. *Polymer Composites* 21: 72-83.

127. Saikko, V. 1993. Wear and friction properties of prosthetic joint materials evaluated on a reciprocating pin-on-flat apparatus. *Wear* 166: 169-178.
128. Samyn, P., P. De Baets, and G. Schoukens. 2009. Influence of Internal Lubricants (PTFE and Silicon Oil) in Short Carbon Fibre-Reinforced Polyimide Composites on Performance Properties. *Tribology Letters* 36: 135-146.
129. Sawyer, W. G., K. D. Freudenberg, P. Bhimaraj, and L. S. Schadler. 2003. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles. *Wear* 254: 573-580.
130. Singh, R., A. Mattoo, and A. Saigal. 2006. Optimizing the design and impact behavior of a polymeric enclosure. *Materials & Design* 27: 955-967.
131. Sinha, S. K., and B. J. Briscoe. 2009. *Polymer tribology*. Imperial College Press.
132. Sinmazcelik, T., and I. Taskiran. 2007. Erosive wear behaviour of polyphenylenesulphide (PPS) composites. *Materials & Design* 28: 2471-2477.
133. Stachowiak, G. W. 2000. Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear. *Wear* 241: 214-219.
134. Stachowiak, G. W., and A. W. Batchelor. 2005. *Engineering tribology*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
135. Stamm, M. 2007. *Polymer surfaces and interfaces: characterization, modification and applications*. Springer.
136. Stout, K., and L. Blunt. 2000. *Three-dimensional surface topography*. Penton.
137. Stout, K. J. 2000. *Development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions*. Penton Press.
138. Stout, K. J., T. G. King, and D. J. Whitehouse. 1977. Analytical techniques in surface topography and their application to a running-in experiment. *Wear* 43: 99-115.
139. Szeliga, D., J. Gawad, and M. Pietrzyk. 2004. Parameters identification of material models based on the inverse analysis. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.* 14: 549-556.
140. Tanaka, K., Y. Uchiyama, and S. Toyooka. 1973. The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene. *Wear* 23: 153-172.
141. Theiler, G. R., and T. Gradt. Friction and wear of PEEK composites in vacuum environment. *Wear* 269: 278-284.
142. Tillier, Y. 1998. Identification par analyse inverse du comportement mécanique des polymères solides ; Application aux sollicitations multiaxiales et rapides. Thèse de doctorat, ENSMP.
143. Torrance, A. A. 1997. A simple datum for measurement of the Abbott curve of a profile and its first derivative. *Tribology International* 30: 239-244.
144. Truțașu, D., A. Besnea, G. Andrei, and L. Deleanu. 2011. The Influence of adding materials used to improve the tribological properties of PEEK matrix composites. The Annals of "DUNĂREA DE JOS" University of Galați, Fascicle VIII, *Tribology XVII*, 2: 43-47.
145. Truțașu, D., A. Besnea, G. Andrei, and D. Dima. 2011. Parameters identification of mechanical behaviour law for polyether-ether-ketone

- composites. *Annals of DAAAM & Proceedings of the 22th DAAAM International World Symposium* 22: 1271-1272.
146. Truhan, J. J., R. Menon, and P. J. Blau. 2005. The evaluation of various cladding materials for down-hole drilling applications using the pin-on-disk test. *Wear* 259: 1308-1313.
  147. Tudor, A. 1990. Contactul real al suprafetelor de frecare. Editura Academiei, București,
  148. Uchiyama, Y., T. Iwai, Y. Ueno, and Y. Uezi. 1997. Friction and wear of PTFE-filled PPS and the role of PTFE filler. *Proc. of First World Tribology Congress*: 435-441.
  149. Unal, H., A. Mimaroglu, and T. Aruda. 2006. Friction and wear performance of some thermoplastic polymers and polymer composites against unsaturated polyester. *Applied Surface Science* 252: 8139-8146.
  150. Unal, H., U. Sen, and A. Mimaroglu. 2005. Abrasive wear behaviour of polymeric materials. *Materials & Design* 26: 705-710.
  151. Vande Voort, J., and S. Bahadur. 1995. The growth and bonding of transfer film and the role of CuS and PTFE in the tribological behavior of PEEK. *Wear* 181-183, Part 1: 212-221.
  152. Voss, H., and K. Friedrich. 1987. On the wear behaviour of short-fibre-reinforced peek composites. *Wear* 116: 1-18.
  153. Wakeman, M. D., T. A. Cain, C. D. Rudd, R. Brooks, and A. C. Long. 1999. Compression moulding of glass and polypropylene composites for optimised macro- and micro-mechanical properties II. Glass-mat-reinforced thermoplastics. *Composites Science and Technology* 59: 709-726.
  154. Wang, Q.-H., Q.-J. Xue, W.-M. Liu, and J.-M. Chen. 2000. Effect of nanometer SiC filler on the tribological behavior of PEEK under distilled water lubrication. *Journal of Applied Polymer Science* 78: 609-614.
  155. Wang, Q.-H., Q.-J. Xue, W.-M. Liu, and J.-M. Chen. 2000. The friction and wear characteristics of nanometer SiC and polytetrafluoroethylene filled polyetheretherketone. *Wear* 243: 140-146.
  156. Wang, Q., Q. Xue, H. Liu, W. Shen, and J. Xu. 1996. The effect of particle size of nanometer ZrO<sub>2</sub> on the tribological behaviour of PEEK. *Wear* 198: 216-219.
  157. Wang, Q., Q. Xue, and W. Shen. 1997. The friction and wear properties of nanometre SiO<sub>2</sub> filled polyetheretherketone. *Tribology International* 30: 193-197.
  158. Whitehouse, D. J. 2002. Surfaces and their measurement. HPS.
  159. Xian, G., and Z. Zhang. 2005. Sliding wear of polyetherimide matrix composites: I. Influence of short carbon fibre reinforcement. *Wear* 258: 776-782.
  160. Yan, F., W. Wang, Q. Xue, and L. Wei. 1996. The correlation of wear behaviors and microstructures of graphite-PTFE composites studied by positron annihilation. *Journal of Applied Polymer Science* 61: 1231-1236.
  161. Yan, F., Q. Xue, and S. Yang. 1996. Debris formation process of PTFE and its composites. *Journal of Applied Polymer Science* 61: 1223-1229.

162. Yang, E. L., J. P. Hirvonen, and R. O. Toivanen. 1991. Effect of temperature on the transfer film formation in sliding contact of PTFE with stainless steel. *Wear* 146: 367-376.
163. Zhao, Q., and S. Bahadur. 2002. Investigation of the Transition State in the Wear of Polyphenylene Sulfide Sliding Against Steel. *Tribology Letters* 12: 23-33.
164. Zhao, Q., and S. Bahadur. 1999. The mechanism of filler action and the criterion of filler selection for reducing wear. *Wear* 225-229, Part 1: 660-668.
165. Zinenko, S. A. 1992. Mathematical modelling of self-organization in tribosystems I. Macroscopic states and time structures. *Wear* 156: 351-363.
166. SR EN ISO 4287: 2003, Specificații geometrice pentru produse (GPS) Starea suprafeței: Metoda profilului. Termeni, definiții și parametri de stare a profilului.
167. SPIP, The Scanning Probe Image Processor SPIP, Version 5.8. (2011).
168. Mechanical Testing and evaluation, vol. 8, ASM International Handbook Committee, 2000.
169. Materials Characterization vol. 10, ASM International Handbook Committee, 2000.
170. SR EN ISO 12085: 1999, Specificații geometrice pentru produse (GPS) Starea suprafeței: Metoda profilului.
171. SR EN ISO 13565-2: 1999, Specificații geometrice pentru produse (GPS) Starea suprafeței: Metoda profilului; Suprafețele cu proprietăți funcționale diferite în funcție de niveluri. Partea a doua: Caracterizarea înălțimilor utilizând curba lungimilor portante relative.
172. SR EN ISO 11562: 1999, Specificații geometrice pentru produse (GPS) Starea suprafeței: Metoda profilului – Caracteristici metrologice ale filtrelor cu corecție de fază.
173. SR ISO 4287/A 99: 2003, Geometrical product specification (GPS) Surface texture: Profile method. Terms, definition and surface texture parameters.
174. EN ISO 4289: 1997, Geometrical product specification (GPS) Surface texture: Rules and procedures for the assessment of surface texture.
175. DIN 4776 (1990-05) Determination Of Surface Roughness Parameters Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2 Serving To Describe The Material Component Of Roughness Profile.
176. [www.ensinger.com](http://www.ensinger.com)
177. [http://www.mat.ensmp.fr/Pages/jb/COURS\\_MATERIAUX/Cours\\_8\\_Micro\\_Polymere.pdf](http://www.mat.ensmp.fr/Pages/jb/COURS_MATERIAUX/Cours_8_Micro_Polymere.pdf)

Lucrări rezultate din cercetare

1. **Besnea, Aida**, Dan Trufașu, Gabriel Andrei, Petrică Alexandru, Lorena Deleanu; The influence of sliding speed on the friction coefficient of polyphenylene sulphide matrix composites under dry sliding regime; The Annals of "DUNĂREA DE JOS" University of Galați, Fascicle VIII, Tribology, 2011 (XVII), Issue 2, ISSN 1221-4590, p. 38-42, 2011. (BDI - PROQUEST -CSA Illumina <http://www.proquest.co.uk/en-UK/products/titlelists/tl-csa.shtml>), înregistrată la *Index Copernicus Journals Master List* și în EBSCO database).
2. **Besnea Aida**, Dan Trufașu, Gabriel Andrei, Lorena Deleanu; Wear, friction and temperature monitoring of polyphenylene sulphide composites under dry sliding regime, Annals of DAAAM & Proceedings of the 22th DAAAM International World Symposium, 23-26th November 2011, vol. 22, no. 1, Vienna, Austria, p. 1277-1278, 2011. (CPCI integrată în *Web of Science Thompson Reuters*; EBSCO Publishing Biographical Database; Thompson Gale).
3. Andrei, G. Deleanu, L. Maftei, L. Birsan, G. **Besnea, Aida**. On Wear Behaviour of a Composite Class with Micro-Nano Adding Particles and PA Matrix; *Materiale Plastice* 47; nr 3; p. 356-363; 2010.
4. Deleanu Lorena, Gabriel Andrei, Sorin Ciortan, Alina Cantaragiu, **Aida Besnea**, Cătălin Trufașu, Gianina Podaru; Statistical Assessment of Surface Quality Using 3D Profilometry Parameters; *Analele Universitatii "Dunarea de Jos" din Galați- Tribologie*, Fascicula VIII, Nr.1; p. 20-30; 2009. (BDI - PROQUEST -CSA Illumina <http://www.proquest.co.uk/en-UK/products/titlelists/tl-csa.shtml>), înregistrată la *Index Copernicus Journals Master List* și în EBSCO database).
5. Trufașu, D., **Aida Besnea**, Gabriel Andrei, Lorena Deleanu; The Influence of adding materials used to improve the tribological properties of PEEK matrix composites; The Annals of "DUNĂREA DE JOS" University of Galați, Fascicle VIII, Tribology, 2011 (XVII), Issue 2, ISSN 1221-4590, p. 43-47, 2011. (BDI - PROQUEST -CSA Illumina <http://www.proquest.co.uk/en-UK/products/titlelists/tl-csa.shtml>), înregistrată la *Index Copernicus Journals Master List* și în EBSCO database).
6. Trufașu D., **Aida Besnea**, Gabriel Andrei, Dumitru Dima; Parameters identification of mechanical behaviour law for polyether-ether-ketone composites, Annals of DAAAM & Proceedings of the 22th DAAAM International World Symposium, 23-26th November 2011, vol. 22, no. 1, Vienna, Austria, p. 1271-1272, 2011. (CPCI integrată în *Web of Science Thompson Reuters*; EBSCO Publishing Biographical Database; Thompson Gale).
7. **Deleanu Lorena, Laura Maftei, Gabriel Andrei, Alina Cantaragiu and Aida Besnea**; Processes characterising tribological behaviour of polymeric composites with micro glass spheres; International Conference on Polymers Processing in Engineering PPE 2009 nr. 2; p. 102-109; 2009.
8. **Besnea Aida**; Caracterisation tribologique des composite polymeres avec de spheres verre micro; Journee des doctorants INSA de Rennes, 9 dec. 2009.

