



ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI,
CERCETĂRII, TINERETULUI ȘI
SPORTULUI

UNIVERSITATEA DUNĂREA DE
JOS DIN GALAȚI



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
CERCETĂRII
TINERETULUI
ȘI SPORTULUI

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

Conducător științific:

Prof. dr. ing. Iulian-Gabriel BIRSAN

Doctorand:

Igor ROMAN

Galați 2012



**UNIVERSITATEA DUNĂREA DE JOS DIN
GALAȚI**

**Facultatea de Mecanică
Departamentul de organe de mașini și
grafică**



TEZĂ DE DOCTORAT

Contribuții la studiul proprietăților mecano-tribologice ale unor compozite polimerice epoxidice

REZUMAT

Conducător științific:

Prof. dr. ing. Iulian-Gabriel BIRSAN

Doctorand:

Igor ROMAN

GalățI 2012

Cuprins

1. Stadiul actual în tribologia compozitelor polimerice.....	8
1.1. Introducere.....	8
1.2. Rășina epoxidică ca element constitutiv pentru clasa compozitelor polimerice	9
1.3. Materiale utilizate pentru armarea compozitelor epoxidice.....	9
1.4. Tribologia compozitelor polimerice	10
1.4.1. Parametrii procesului tribologic.....	10
1.4.2. Răspunsul tribologic al interfeței de contact la sisteme compozite	10
1.4.3. Influența armării cu fibre scurte asupra parametrilor tribologici	12
1.4.4. Influența aditivării de tip micro și nano în compozite polimerice asupra parametrilor tribologici	12
1.4.5. Metode de testare tribologică a compozitelor polimerice.....	13
1.5. Rețele neuronale în tribologia compozitelor polimerice.....	13
1.6. Obiectivele tezei de doctorat	14
2. Formarea materialelor compozite cu matrice epoxidică.....	15
2.1. Etapele formării materialelor compozite cu matrice epoxidică.....	15
2.1.1. Determinarea metodei de formare a compozitelor.....	15
2.1.2. Analiza compatibilității dintre matricea bicomponentă și elementele de armare.....	16
2.1.3. Utilizarea pulberii de argilă ca agent de dispersie	16
2.2. Metode experimentale de evaluare a proprietăților compozitelor formate	16
2.2.1. Determinarea proprietăților tribologice (știft pe disc, bloc pe inel)	16
2.2.2. Determinarea proprietăților mecanice (la încovoiere și la compresiune).....	16
2.2.3. Determinarea proprietăților termice.....	17
2.2.4. Rezolvarea unei probleme folosind rețele neuronale	17
2.3. Evaluarea proprietăților compozitelor armate cu argilă în A, în B și în amestecul prepolimeric (clasa de compozite ABP).....	18
2.3.1. Analiza rezultatelor privind comportamentul tribologic a clasei de compozite ABP	18
2.3.2. Analiza rezultatelor experimentale privind proprietățile mecanice a clasei de compozite ABP.....	19
2.3.3. Analiza rezultatelor experimentale privind proprietățile termice a clasei de compozite ABP.....	19
2.3.4. Utilizarea rețelelor neuronale pentru alegerea modului de dispersie a argilei în rășina epoxidică	20
2.4. Evaluarea proprietăților compozitelor armate cu diferite concentrații de argilă ..	21
2.4.1. Analiza rezultatelor privind comportarea tribologică a compozitelor aditivate cu diferite concentrații de argilă	22
2.4.2. Analiza mecanică a compozitelor aditivate cu diferite concentrații de argilă.....	24

2.4.3.	Analiza proprietăților termice a compozitelor aditivate cu diferite concentrații de argilă.....	24
2.4.4.	Utilizarea rețelelor neuronale pentru alegerea concentrației de argilă la care proprietățile de bază a rășinii nu se modifică semnificativ	25
2.5.	Materiale compozite formate pentru acest studiu	26
2.6.	Concluzii.....	26
3.	Analiza proprietăților tribologice ale compozitelor cu matrice epoxidică	27
3.1.	Evaluarea proprietăților tribologice ale compozitelor formate prin testului bloc pe inel	27
3.1.1.	Analiza comportării tribologice <i>bloc pe inel</i> a rășinii epoxidice neaditivate comparativ cu rășina epoxidică aditivată cu 10% vol. de argilă	28
3.1.2.	Analiza comportării tribologice <i>bloc pe inel</i> a rășinii epoxidice aditivate cu pulbere aramidică.	29
3.1.3.	Analiza comportării tribologice <i>bloc pe inel</i> a rășinii epoxidice armate cu fibre scurte de carbon	30
3.1.4.	Utilizarea rețelelor neuronale artificiale pentru predicția și optimizarea proprietăților tribologice ale compozitelor polimerice	31
3.2.	Uzura compozitelor formate.....	34
3.2.1.	Analiza comportării la uzura prin abraziune a rășinii epoxidice neaditivate comparativ cu rășina epoxidică aditivată cu 10% vol. de argilă	34
3.2.2.	Analiza comportării la uzura a rășinii epoxidice aditivate cu pulbere aramidică.....	35
3.2.3.	Analiza comportării la uzura a rășinii epoxidice armate cu fibre scurte de carbon.....	36
3.2.4.	Analiza intensității specifice a uzurii liniare medii pentru compozitele epoxidice formate.....	38
3.2.5.	Analiza rezistenței la uzură pentru compozitele epoxidice formate.....	38
3.2.6.	Utilizarea rețelelor neuronale artificiale pentru predicția și optimizarea proprietăților tribologice	39
3.3.	Concluzii.....	41
4.	Analiza proprietăților mecanice și termice ale compozitelor epoxidice	42
4.1.	Analiza proprietăților mecanice ale compozitelor epoxidice formate	42
4.1.1.	Analiza proprietăților mecanice la încovoiere	43
4.1.1.	Analiza proprietăților mecanice la compresiune	44
4.2.	Analiza proprietăților termice ale compozitelor epoxidice formate.....	47
4.2.1.	Analiza dilatării termice.....	47
4.2.2.	Analiza rezultatelor experimentale pentru căldura specifică	47
4.2.3.	Analiza conductivității termice	48
4.3.	Utilizarea rețelelor neuronale artificiale pentru optimizarea proprietăților tribologice.....	49
4.3.1.	Analiza interdependenței intrări-ieșiri pentru modelul neuronal artificial	50

4.3.2. Optimizarea concentrației de aditiv pentru modelul neuronal artificial.....	50
4.4. Concluzii.....	51
5. Concluzii generale și contribuții personale	52
5.1. Concluzii generale.....	52
5.2. Contribuții personale.....	54

Lista cu figuri

Figura 1-1 Tipuri intrinseci ale naturii unui compozit [18]	11
Figura 1-2 a. Rezistența la uzură pentru rășina epoxidică aditivată cu grafit (Gr);și b. cu carbură de siliciu (SiC) [19]	11
Figura 1-3 Rata de uzură a rășinii epoxidice armate cu: grafit, TiO ₂ , pulbere aramidică și fibre scurte de carbon [20]; μ- coeficient de frecare, W _s - rata specifică de uzură	11
Figura 1-4 Factorii principali ce influențează performanța uzurii în cazul compozitelor armate cu fibre scurte [22], [23].....	12
Figura 1-5 a. Rata de uzură a rășinii epoxidice ranforsate cu fibre scurte de carbon tratate diferit; b. SEM – uzura specifică a fibrei de carbon în matricea epoxidică (C1,C3 – tratamente speciale) [17]	12
Figura 1-6 a. Rata de uzură a rășinii epoxidice aditivată cu Al ₂ O ₃ ; și b. silicat de calciu CaSiO ₂ [28].....	13
Figura 1-7 Predicția comportamentului tribologic cu ajutorul rețelelor neuronale artificiale: a. Rata de uzură; b. Coeficientul de frecare al compozitelor cu matrice PPS aditivată cu TiO ₂ în diferite concentrații [46].....	14
Figura 2-1 Coeficientul de frecare a clasei de compozite ABP.....	18
Figura 2-2 Rata de uzură a clasei de compozite ABP.....	19
Figura 2-3 Dilatarea termică a clasei de compozite ABP	19
Figura 2-4 Căldura specifică a clasei de compozite ABP	20
Figura 2-5 Importanța relativă a intrărilor față de ieșiri (pentru alegerea ordinii de amestec)	21
Figura 2-6 Sensibilitatea relativă a ieșirilor față de intrări (pentru alegerea ordinii de amestec)	21
Figura 2-7 Variația relativă față de valoarea rășinii epoxidice a coeficientului de frecare pentru compozitele aditate cu mai multe concentrații de argilă.....	23
Figura 2-8 Variația relativă față de valorile rășinii epoxidice a ratelor de uzură pentru compozitele aditate cu mai multe concentrații de argilă	23
Figura 2-9 Variația relativă față de valorile rășinii epoxidice a proprietăților mecanice pentru compozitele aditate cu mai multe concentrații de argilă.....	24
Figura 2-10 Importanța relativă a intrărilor față de ieșiri (pentru alegerea concentrației optime de argilă).....	25
Figura 2-11 Sensibilitatea relativă a ieșirilor față de intrări (pentru alegerea concentrației optime de argilă)	26
Figura 3-1 Coeficienții de frecare medii pentru rășina epoxidică și compozitul epoxi/argilă (vol. 10%)	28
Figura 3-2 Intensitatea uzurii liniare specifice medie pentru rășina epoxidică și compozitul epoxi/argilă (vol. 10%)	29
Figura 3-3 Coeficienții de frecare medii pentru compozitele aditate cu pulbere aramidică.....	29
Figura 3-4 Intensitatea uzurii liniare specifice medie pentru compozitele aditate cu pulbere aramidică	30

Figura 3-5 Coeficienții de frecare medii pentru compozitele armate cu diferite concentrații de fibre scurte de carbon.....	30
Figura 3-6 Intensitatea uzurii liniare specifice medie pentru compozitele armate cu diferite concentrații de fibre scurte de carbon.....	31
Figura 3-7 Rețeaua neuronală artificială: a. Structura optimizată prin algoritmi genetici; .	32
Figura 3-8 Eroarea relativă a proprietăților tribologice previzionate cu ajutorul rețelei neuronale artificiale față de valoarea medie experimentală	32
Figura 3-9 Ierarhia influențelor intrărilor asupra ieșirilor pentru rețeaua neuronală artificială	33
Figura 3-10 Erorile relative ale coeficientului de frecare și a intensității uzurii liniare specifice pentru concentrațiile de aditiv optimizate cu ajutorul rețelei neuronale artificiale față de valoarea medie experimentală.....	34
Figura 3-11 a. Comparația uzurii liniare pentru rășina epoxidică și compozitul epoxi/argilă (vol.10%) obținute în urma testului de uzură severă; b. Porțiuni din traseul pinului din polimer pe discul abraziv.....	35
Figura 3-12 Imagini SEM pe suprafața de contact pentru: a. rășina epoxidică; b. compozitul epoxidic aditivat cu 10% pulbere de argilă.	35
Figura 3-13 Uzura liniară pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică obținute în testului de uzură severă.....	36
Figura 3-14 Imagini SEM ale suprafeței de contact pentru compozitul epoxidic aditivat cu 25% pulbere aramidică obținute în urma testului de uzură severă: a. Particule aramidice înglobate în matricea epoxidică (50 μ m); b. Urme ale uzurii severe a particulei aramidice (20 μ m).....	36
Figura 3-15 Uzura liniară pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică obținute în urma testului de uzură severă.....	37
Figura 3-16 Imagini SEM pe suprafața de contact pentru compozitul epoxidic armat cu 25% fibre scurte de carbon obținute în urma testului de uzură prin abraziune: a. urma fibrei de carbon rupte din matrice; b. fibrele uzate cu particulele epoxidice reziduale	37
Figura 3-17 Intensitatea uzurii liniare specifice medie pentru compozitele formate obținută în urma testului de uzură severă.....	38
Figura 3-18 Coeficientul de frecare mediu pentru compozitele formate, obținut în urma testului de uzură severă.....	38
Figura 3-19 Rețeaua neuronală artificială: a. Structura optimizată prin algoritmi genetici;b. Arhitectura rețelei.....	39
Figura 3-20 Erorile relative ale coeficientului de frecare, ale intensității uzurii liniare și ale rezistenței la uzură obținute în urma testului de uzură severă previzionate cu ajutorul rețelei neuronale artificiale față de valorile medii experimentală	40
Figura 3-21 Ierarhia influențelor intrărilor asupra ieșirilor pentru rețeaua neuronală artificială	40
Figura 3-22 Erorile relative ale coeficientului de frecare, ale intensității de uzură liniară și rezistenței la uzură pentru concentrațiile de aditiv optimizate cu ajutorul rețelei neuronale față de valoarea medie experimentală.....	41
Figura 4-1 Proprietățile mecanice la încovoiere ale compozitelor aditivate cu pulbere aramidică: a. Modulul de elasticitate; b. Tensiunea la rupere; c. Energia la rupere	43
Figura 4-2 Proprietățile mecanice la încovoiere ale compozitelor cu 10% argilă armate cu fibre scurte de carbon: a. Modulul de elasticitate; b. Tensiunea la rupere; c. Energia la rupere	44
Figura 4-3 Diagrama tensiune – deformație pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică	45
Figura 4-4 Proprietățile mecanice la compresiune pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică: a. Modulul de elasticitate; b. Limita de curgere.....	45

Figura 4-5 <i>Diagrama tensiune – deformație pentru compozitele armate cu fibre scurte de carbon</i>	46
Figura 4-6 <i>Proprietățile mecanice la compresiune pentru compozitele armate cu fibre scurte de carbon: a. Modulul de elasticitate; b. Limita de curgere</i>	46
Figura 4-7 <i>Proprietăți termice pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică: a. Dilatarea termică; b. Coeficientul liniar de dilatare termică</i>	47
Figura 4-8 <i>Proprietăți termice pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică: a. Dilatarea termică; b. Coeficientul liniar de dilatare termică</i>	47
Figura 4-9 <i>Căldura specifică pentru materialele compozite aditivate cu pulbere aramidică</i>	48
Figura 4-10 <i>Căldura specifică pentru materialele compozite cu 10% argilă armate cu diferite concentrații de fibre scurte de carbon</i>	48
Figura 4-11 <i>Conductivitatea termică pentru materialele compozite: a. aditivate cu pulbere aramidică; b. armate cu fibre scurte de carbon</i>	49
Figura 4-12 <i>Rețeaua neuronală artificială: a. Structura optimizată cu algoritmi genetici; b. Arhitectura rețelei</i>	49
Figura 4-13 <i>Importanța relativă a intrărilor față de ieșiri</i>	50
Figura 4-14 <i>Erorile relative ale proprietăților tribologice față de valoarea medie experimentală pentru concentrațiile de aditivi optimizate cu ajutorul rețelei neuronale artificiale</i>	51

Lista cu tabele

Tabelul 1 <i>Tipul și modul de aditivare cu argilă a rășinii epoxidice</i>	18
Tabelul 2 <i>Compozite formate cu diferite concentrații de argilă</i>	22
Tabelul 3 <i>Materiale compozite formate cu pulbere aramidică și cu fibre scurte de carbon</i> ..	26
Tabelul 4 <i>Parametrii de testare utilizați pentru caracterizarea tribologică</i>	28
Tabelul 5 <i>Parametrii de control al algoritmului genetic</i>	31

1. Stadiul actual în tribologia compozitelor polimerice

1.1. Introducere

Evoluția realizărilor în domeniul materialelor compozite, coincide progresiv, pe termen mediu, cu evoluția și dezvoltarea tehnologică. Cercetarea de bază este direcționată către descoperirea relațiilor dintre proprietățile care determină funcționalitatea materialului și gradul lui de anizotropie.

Este important de remarcat că diferite proprietăți ale materialului compozit sunt determinate de dinamica și structura moleculară iar aceasta ar putea fi extrem de neliniară pentru diferite scări [1], [2], [3], [4], [5], cunoașterea acestora este esențială dacă vrem ca funcționalitatea materialelor să fie asigurată pe perioade lungi de timp. Necesitatea determinării aspectelor constitutive (ale formei și calității suprafețelor, prezența intruziunilor gazoase, distribuția armăturii și/sau aditivului) și a proprietăților fizice și mecanice, are tendința de a standardiza, nu numai metodele de formare dar și metodele de caracterizare și testare pentru aceste materiale.

Subiectul acestei teze se focalizează pe proiectarea, formarea și testarea unor materiale compozite cu matrice epoxidică, aditivată cu diferite pulberi (argilă, amidon, negru de fum, titanat de aluminiu, titanat de litiu, zinc, ferită, pulbere aramidică) și ranforsată cu diferite fibre scurte și țesături (sticlă, carbon, fibre și țesături aramidice). Pentru crearea compozitului a fost necesară determinarea compatibilităților chimice a componentelor (a matricei și a aditivului) cu scopul de a dispersa omogen materialul de umplură în matricea utilizată. Astfel, o etapă a fost identificarea metodei de dispersie. Au fost testate dispersii mecanice și chimice ale agenților de armare în matricea epoxidică. După testarea și identificarea proprietăților, a fost investigată ordinea de aditivare în matricea bi-componentă. Datorită incompatibilității unor materiale de umplură cu matricea (aglomerări, sedimentări etc.) s-a apelat la componente cu bune proprietăți de dispersie. Prin urmare, s-a recurs la identificarea cantității maxime de component – dispersant, ce poate fi aditivată într-un volum de rășină epoxidică fără ca proprietățile rășinii să se modifice semnificativ.

Primul capitol al tezei prezintă generalități din sfera compozitelor polimerice ce țin de importanța lor în diferite aplicații și tendințe de consum și de cercetare. De asemenea ținând cont de importanța acestui capitol, s-au evaluat cercetările la ora actuală în ceea ce privește studiile teoretice și experimentale ale proprietăților tribologice ale materialelor compozite polimerice. Spre finalul acestui capitol au fost identificate obiectivele principale ce s-au urmărit în elaborarea tezei.

În al doilea capitol, pentru o mai bună înțelegere a modului cum au fost formate materialele, s-a recurs la o caracterizare amănunțită a componentelor care au fost utilizate la formarea compozitului, caracterizare ce a motivat, de fapt, utilizarea acestora ca materiale de umplură. Tot în acest capitol au fost identificate concentrațiile optime ale agenților de armare pentru formarea compozitului final, astfel, pentru unele compozite, a fost necesară testarea anumitor proprietăți, în urma cărora, cu ajutorul rețelelor neuronale, au fost identificate concentrații optime de aditiv.

Capitolul trei are un caracter profund experimental. Pentru materialele formate, descrise explicit în capitolul anterior, au fost evaluate detaliat proprietățile tribologice. Au fost puse în discuție metode experimentale clasice utilizate pentru evaluarea parametrilor tribologici specifici (coeficientul de frecare, uzura). Au fost utilizate două tribotestere, după cum urmează *bloc pe inel* și *știft pe disc* pentru evaluarea coeficientului

de frecare și a pune în evidență uzura abrazivă. Astfel, a fost identificată influența tipului de aditiv și a raportului de aditivare asupra coeficientului de frecare și a ratei de uzură.

Următorul capitol reprezintă o tendință actuală în cercetare. Modelarea proprietăților cu scopul de a le simula și de a le anticipa este ceea ce dictează în prezent evoluția studiilor științifice. Astfel, datorită complexității de factori ce influențează un comportament tribologic, s-a apelat la o metodă statistică neconvențională de analiză, și anume rețele neuronale artificiale. Datorită modului de intercorelare a datelor, rețele neuronale s-au dovedit a fi un instrument extraordinar de eficace în optimizarea și previzionarea, nu doar a proprietăților tribologice, ci și a unui complex de proprietăți mecanice, termice pentru materialele compozite formate.

Ultimul capitol constă în cuantificarea întregului studiu prin concluzionarea celor mai deosebite realizări. De asemenea, ca parte obligatorie, au fost evidențiate contribuțiile personale, concepții pentru studii viitoare și metode de diseminare rezultatelor obținute.

1.2. Rășina epoxidică ca element constitutiv pentru clasa compozitelor polimerice

Datorită caracteristicilor mecanice, chimice și electrice foarte bune rășinile epoxidice sunt cele mai utilizate materiale din clasa compușilor termorigizi. Astfel din totalul termorigizilor utilizați pentru compozite, matricea epoxidică reprezintă cam 72%, urmate de rășina poliesterică nesaturată cu 12%, fenolice – 9%, altele - 7%, [6].

1.3. Materiale utilizate pentru armarea compozitelor epoxidice

Scopul armării unui polimer este de a îmbunătăți anumite proprietăți ale materialului final [7], [8], [9].

Pentru obținerea unor performanțe optime, cu costuri minime, se folosesc o varietate de aditivi sau modificatori [10]. Inițial pulberile au fost utilizate cu scopul de a reduce costul materialului final. Pe parcurs s-a observat că unele din aceste materiale modificau în sens pozitiv proprietățile polimerilor. În prezent, scopul utilizării pulberilor constă în obținerea unor compozite cu proprietăți specifice. Astfel introducerea unor materiale de umplură în compozitele polimerice determină: îmbunătățirea stabilității dimensionale, creșterea modulusului de elasticitate, scăderea coeficientului de dilatare termică, creșterea rezistenței la abraziune, etc. [8], [9], [10].

Referitor la procedeele de obținere a materialelor compozite, acestea se pot clasifica după: forma și dimensiunea piesei, mărimea seriei de fabricație, natura matricei polimerice, cadența de formare, calitatea pieselor, costul pieselor, etc. [11].

O atenție deosebită este acordată comportării tribologice a materialelor compozite. O serie de avantaje care pledează pentru utilizarea materialelor compozite polimerice în cuple de frecare sunt: viteza mică de uzură în absența lubrifianților convenționali, coeficienți scăzuți de frecare, capacitatea de a amortiza șocurile și de a funcționa fără zgomot, consum redus de putere și capacități de încărcare relativ mari. Unul din marile dezavantaje în aplicații tribologice este instabilitatea proprietăților la variația temperaturii.

Studiile teoretice, concretizate prin realizarea unor modele matematice, au condus la posibilitatea proiectării proprietăților materialelor compozite. În aceste condiții există posibilitatea predicției parametrilor compozitului fără a avea, însă, garanția comportamentului identic în aplicația reală, ceea ce impune etape de validare sau verificare a modelelor create.

1.4. Tribologia compozitelor polimerice

Astăzi, cele mai avansate aplicații tehnologice ale polimerilor implică fenomene de frecare și uzură. Pentru a exploata avantajele economice ale polimerilor și de a le adapta la performanța dispozitivelor și componentelor, ale căror cerințe sunt mereu în creștere în ceea ce privește răspunsul tribologic, este necesară o evaluare fundamentală, nu numai a proprietăților intrinseci ale materialului, ci și a tribosistemului complet [12].

O evaluare și o clasificare a tribosistemelor în funcție de proprietățile lor de fiabilitate și durabilitate se poate face atât pe baza parametrilor de uzură, cât și printr-o caracterizare calitativă a uzurii produse de solicitări tribologice, prin tehnici de măsurare [13]. Cum uzura este provocată de interacțiunile dintre elementele unui tribosistem, parametrii de uzură nu clasifică proprietățile unui singur material, ci sunt întotdeauna raportați la cuplul de materiale, de fapt la tribosistemul respectiv [14].

În acest context, în general, nu este posibil să se modeleze parametrii de uzură din cauza complexității proceselor de uzură. Deci, asemenea parametri trebuie determinați experimental, cu tehnici adecvate de măsurare și testare.

Descrierile calitative și cantitative ale deteriorării materialului în procesul de uzură reprezintă un proces fundamental pentru o analiză comprehensivă a tribosistemului.

1.4.1. Parametrii procesului tribologic

Cei mai discutați parametri în tribologie sunt coeficientul de frecare și rata uzurii [15]. Coeficientul de frecare (definit ca raportul dintre forța de rezistență la alunecare și forța de încărcare) determină cuplurile și sarcinile în contact, iar rata de uzura (definită ca pierderea volumului de material pe distanța de alunecare și pe sarcina aplicată cuplului, cu unitatea de măsură mm^3/Nm) duce la pierderi de material și astfel la o durată de viață limitată. Datorită rolului important al fiecăruia în design, ele devin primare în definirea performanței din sistemele tribologice.

1.4.2. Răspunsul tribologic al interfeței de contact la sisteme compozite

Analiza interfeței oferă o abordare sinergică a frecării și deteriorărilor prin uzură, fiind utilizată și în cazul sistemelor multifazice. Se pot specifica două tipuri de compozite (Figura 1-1). În unele cazuri se consideră faza moale dispersată în faza tare, pentru celelalte invers [16]. În practică se întâlnesc ambele tipuri, atât separat cât și combinate.

1. Faze moi dispersate în fază dură (matrice). Aici se observă două tipuri extreme de comportament: faza moale poate fi imobilă în faza tare (termorigide ranforsate cu fibre de carbon [7] [17]) și celălalt comportament cu faza moale „mobilă”, care poate juca un rol de auto-lubrifiere al compozitului.

2. Faze tari în matrice moale. Premisa de bază constă în faptul că matricea moale este un bun lubrifiant dar nu are stabilitate dimensională. Cel mai des în practică este întâlnit cazul ranforsării PTFE cu fibre de sticlă sau cu particule de metale. Faza tare va reda stabilitate dimensională pentru întreg ansamblu dar și pentru contact.

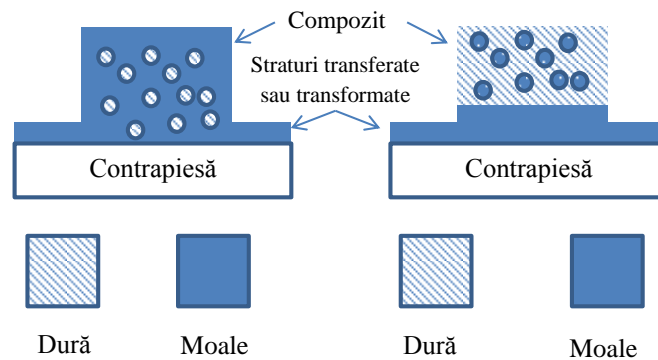


Figura 1-1 Tipuri intrinseci ale naturii unui compozit [18]

Este semnificativ studiul practic al autorilor Briscoe și Sihna [18] care fac o sinteză a mai multor lucrări, clasificând rezultatele prin prisma răspunsului tribologic al interfeței de contact la sistemele compozite.

Pentru fază moale în matrice dură.

În [19] se utilizează particule de grafit în rășină epoxidică, testându-se compozitul format prin metoda știft pe disc, obținându-se o îmbunătățire a rezistenței la uzură, datorită proprietăților de auto-lubrifiere a grafitului (Figura 1-2 a).

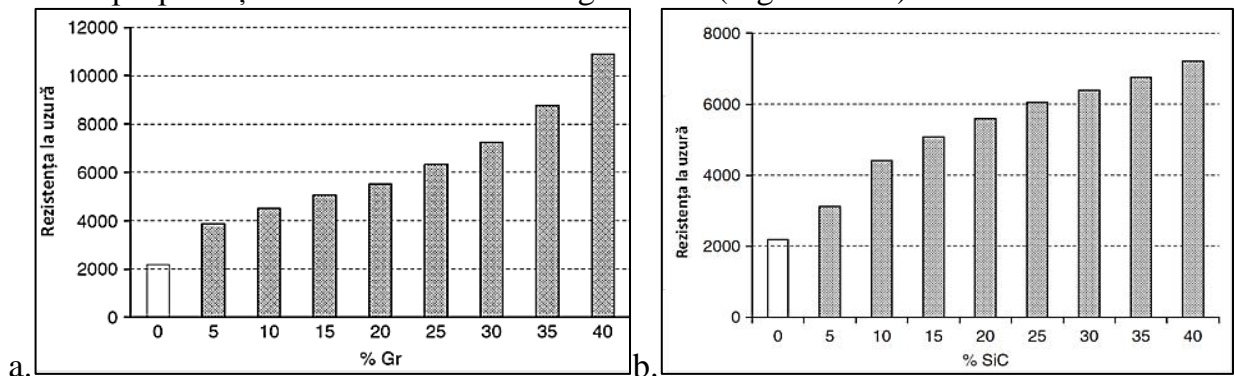


Figura 1-2 a. Rezistența la uzură pentru rășina epoxidică aditivată cu grafit (Gr); și b. cu carbură de siliciu (SiC) [19]

Fază dură în matrice moale. Tot în [19], autorul utilizează carbură de siliciu SiC considerat fază tare în matrice epoxidică – fază moale, obținând astfel o îmbunătățire a rezistenței la uzură (Figura 1-2 b).

În [20], [21], se prezintă rezultatele investigației comportamentului compozitelor cu matrice epoxidică, cu mai multe tipuri de aditivi. Astfel, s-a obținut o scădere semnificativă a coeficientului de frecare în cazul rășinii adivate cu grafit și TiO₂ (Figura 1-3).

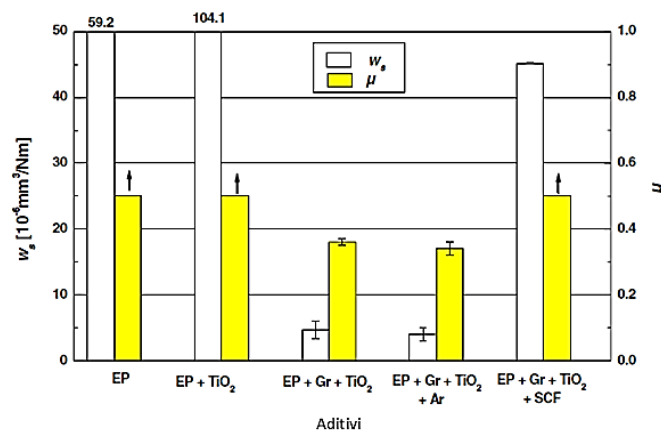


Figura 1-3 Rata de uzură a rășinii epoxidice armate cu: grafit, TiO₂, pulbere aramidică și fibre scurte de carbon [20]; μ - coeficient de frecare, w_s - rata specifică de uzură

1.4.3. Influența armării cu fibre scurte asupra parametrilor tribologici

Dimensiunea, orientarea, duritatea, modulul de elasticitate, și fragilitatea fibrei sunt factorii principali ce influențează performanța la uzura abrazivă a compozitelor [22], [23] (Figura 1-4).

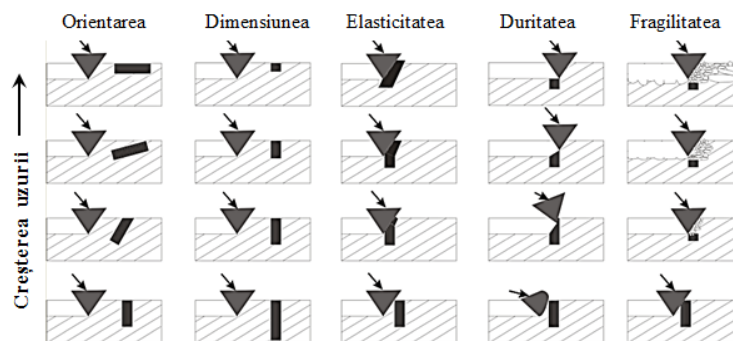


Figura 1-4 Factorii principali ce influențează performanța uzurii în cazul compozitelor armate cu fibre scurte [22], [23]

În [17], autorii utilizează ranforsarea rășinii epoxidice cu fibre scurte de carbon. În urma unui tratament special al fibrelor de carbon (C1, C2) se obțin două dimensiuni (90 μ m și 400 μ m). În urma testelor tribologice efectuate, se ajunge la concluzia că dimensiunea fibrei influențează invers proporțional comportamentul la uzură (Figura 1-5 a). De asemenea, cu ajutorul analizei SEM se observă uzura specifică a fibrelor (Figura 1-5 b).

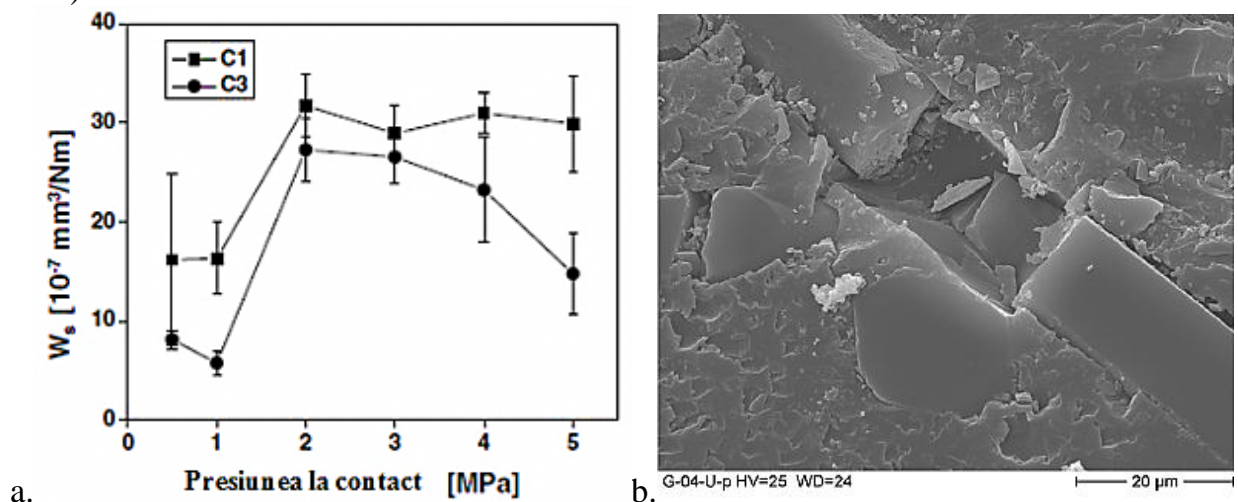


Figura 1-5 a. Rata de uzură a rășinii epoxidice ranforsate cu fibre scurte de carbon tratate diferit; b. SEM – uzura specifică a fibrei de carbon în matricea epoxidică (C1, C3 – tratamente speciale) [17]

1.4.4. Influența aditivării de tip micro și nano în compozite polimerice asupra parametrilor tribologici

Nanocompozitul polimeric s-a definit ca un sistem multe-component, în care constituentul majoritar este un polimer sau un amestec de faze polimerice iar constituentul minoritar are cel puțin una din dimensiuni sub 100nm [24].

Armarea polimerilor cu cantități mici de nanoparticule, în proporție de 1-5% din volum, a dus la obținerea de compozite cu mari avantaje tribologice [25], [26], [27], subliniind astfel importanța nano-particulelor la realizarea compozitelor.

Un exemplu de rășină epoxidică aditivată cu nano-pulberi de Al_2O_3 este în [28]. Materialele compozite formate au fost testate pe bloc pe inel, la viteza de 1m/s și presiunea de 1MPa. Prin urmare, concentrațiile de 0.5% și 1% vol. au determinat o rată a uzurii aproximativ egală cu cea a epruvetei de rășină epoxidică neaditivată. Autorii remarcă cea mai mică rată a uzurii la aditivarea cu 2% de Al_2O_3 (Figura 1-6 a).

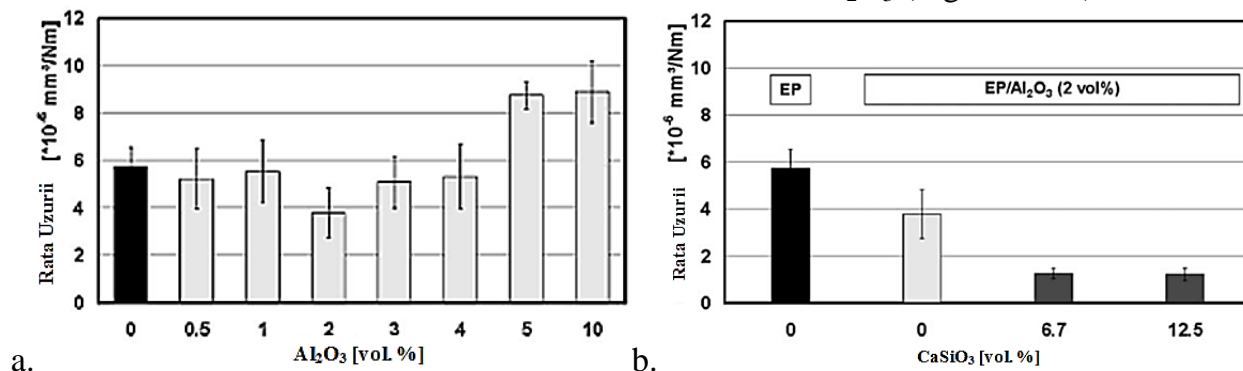


Figura 1-6 a. Rata de uzură a rășinii epoxidice aditivată cu Al_2O_3 ; și b. silicat de calciu $CaSiO_2$ [28]

Tot în [28], cercetarea continuă cu adăugarea în compozit a microparticulelor de silicat de calciu, $CaSiO_2$, observându-se astfel o îmbunătățire a rezistenței la uzură în cazul aditivării cu 6.7 % și 12.5% (Figura 1-6 b).

1.4.5. Metode de testare tribologică a compozitelor polimerice

Laboratorul Național de Fizică din Anglia a identificat aproximativ 400 de metode de testare în toată lumea cu interese industriale și științifice [29], din care cele mai utilizate în cercetare sunt știft pe disc [17], bloc pe inel [7], [17], [21], știft pe placă, la fel sunt și inel pe disc, metoda Tabor [29], inel pe inel. Metoda de testare este determinată în funcție de aplicațiile pentru materialul testat.

Pentru caracterizarea la o scară mai mică a proceselor de frecare și uzură cercetătorii apelează la microscopie, de obicei optice. Avansul extraordinar al informaticii a condus la posibilitatea realizării imaginilor pe instrumente care până acum permiteau obținerea numai a rezultatelor numerice, urmate de o muncă istovitoare de prelucrare și interpretare. Tot datorită dezvoltării tehnicii de calcul și mai ales a metodelor de generare a imaginilor prin prelucrarea datelor obținute, analizele se apropie mai mult de interpretare imagistică [29], [7], [17], [16], [30], [20].

1.5. Rețele neuronale în tribologia compozitelor polimerice

Tentative excepționale vin din încercarea de a modela comportamentul tribologic al compozitelor polimerice cu ajutorul elementelor finite [31]. Incompatibilitatea analizei cu elemente, fie ele finite sau de frontieră, a acestor tipuri de materiale este într-o dezbatere continuă în lumea științifică. Cu argumente puternice în această dezbatere vin metodele statistice netradiționale, și anume rețelele neuronale și algoritmi genetici [32], [33], [34]. În ceea ce privește rețelele neuronale, ele oferă o gamă largă de instrumente (numărul de neuroni, arhitectură, funcții interneuronale) pentru optimizarea sau predicția proprietăților vizate [35], [36].

Rețelele neuronale artificiale au fost recent introduse în domeniul tribologiei [37], [38], [39]. Predicția și optimizarea proprietăților tribologice ale compozitelor este o problemă complexă cu un grad mare de neliniaritate, soluția căreia este dictată de acuratețea predicției. Rețelele neuronale artificiale sunt niște modele performante de estimare multidimensională și neliniară [40]. Complexitatea modelării unui sistem de neuroni într-o rețea face ca la ora actuală să fie cunoscute foarte multe tipuri de astfel de

rețele și să fie în continuă creștere dezvoltarea de altele noi, care să răspundă cerințelor din ce în ce mai exigente ale necesităților din diferite domenii de aplicații. Una dintre cele mai utilizate tipuri de rețele neuronale este cea cu propagare inversă, datorită posibilității de învățare din răspuns (self-learning). Modelul matematic de funcționare a rețelilor a fost adaptat după modelul biologic al neuronilor [41], [42], [43], deși aceste teorii datează de la mijlocul secolului trecut, ele au devenit actuale datorită dezvoltării tehnologice. Computerizarea oferă astfel implementarea și dezvoltarea rețelilor neuronale în diferite probleme [44], [45].

Previzionarea anumitor parametri tribologici necesită existența unei baze de date experimentale. Astfel în [46], răspunsul tribologic al compozitelor este utilizat ca date inițiale, cele previzionate obținându-se în urma unei regresii complexe și intercorelării datelor de intrare prin mecanisme specifice rețelei (Figura 1-7 a și b). Conform experimentelor, ei obțin cea mai mică rată de uzură pentru compozitul cu matrice PPS, cu fibre scurte de carbon 15% și 5% TiO_2 , dar cu ajutorul rețelilor neuronale ei optimizează compoziția obținând 15% fibre scurte de carbon cu 6% TiO_2 .

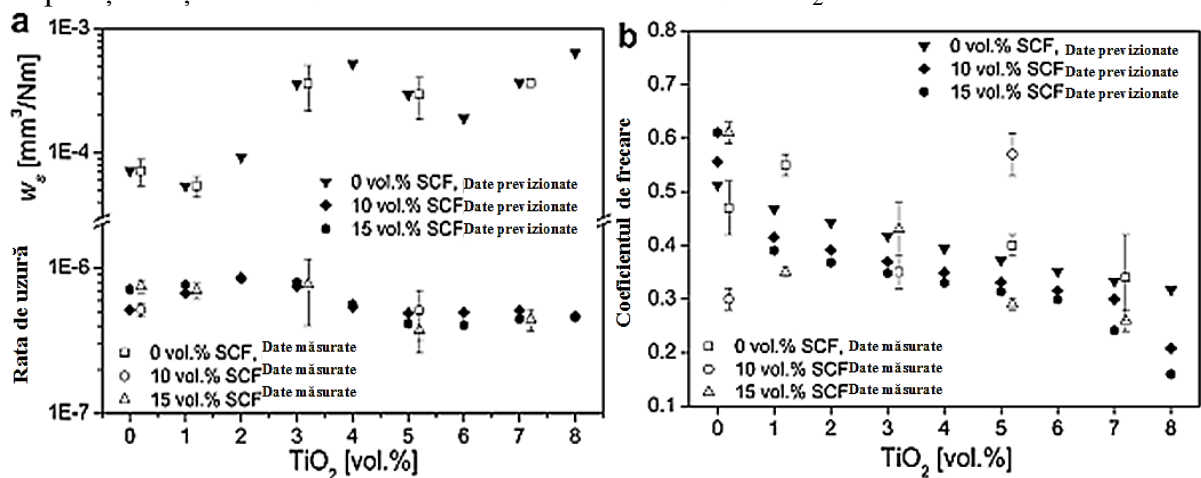


Figura 1-7 Predicția comportamentului tribologic cu ajutorul rețelilor neuronale artificiale: a. Rata de uzură; b. Coeficientul de frecare al compozitelor cu matrice PPS aditivată cu TiO_2 în diferite concentrații [46]

1.6. Obiectivele tezei de doctorat

- ❖ Crearea rețelei optime de aditivare cu pulbere aramidică și armare cu fibre scurte de carbon a unei matrici epoxidice cu scopul îmbunătățirii proprietăților tribologice.
 - Formarea materialelor aditivate cu diferite concentrații de pulbere aramidică, fibre scurte de carbon;
 - Proiectarea unei tehnologii de laborator pentru obținerea materialelor cu concentrațiile stabilite anterior și a epruvetelor;
 - Proiectarea metodologiei de testare și prepararea epruvetelor necesare pentru testarea proprietăților mecanice, termice și tribologice.
 - Influența materialelor de adaos asupra proprietăților compozite formate;
 - Determinarea influenței regimului de testare și a compozitului asupra proprietăților tribologice (coeficienții de frecare, ratele de uzură în anumite condiții);
 - Analiza influenței regimului de testare și a compozitului asupra proprietăților termice (căldura specifică, dilatarea termică și conductivitatea termică);
 - Analiza influenței regimului de testare și a compozitului asupra unor proprietăți mecanice la încovoiere și compresiune;

- Utilizarea metodelor avansate de investigație nedestructivă pentru identificarea proceselor tribologice caracteristice.
- Conceperea unei rețele neuronale pentru determinarea concentrației optime de aditivi pentru clasa compozitelor studiate;
- Proiectarea rețelei neuronale;
 - Identificarea unităților funcționale componente: parametrii de intrare și de ieșire ale rețelei neuronale;
 - Stabilirea arhitecturii rețelei și a modului de interconectare a unităților funcționale;
 - Selectarea unui algoritm de învățare potrivit cu arhitectura rețelei și cu cantitatea de informație obținută;
 - Optimizarea mecanismului de funcționare a rețelelor neuronale cu ajutorul unor algoritmi.
 - ◆ Analiza comparativă mai multor tipuri de algoritmi;
 - ◆ Stabilirea gradului de flexibilitate al rețelei prin specificarea parametrilor ajustabili și manipularea funcțiilor de activare și de transfer.
 - Antrenarea rețelei neuronale: analiza erorii la diferite modele matematice identificate anterior;
 - Utilizarea rețelei neuronale antrenate pentru optimizarea unor parametri tribologici.
- ❖ Validarea modelului neuronal prin formarea compozitului cu concentrații de aditivi obținute în urma optimizării și măsurarea parametrilor tribologici, mecanici și termici.

2. Formarea materialelor compozite cu matrice epoxidică

Toate materialele compozite polimerice ce fac obiectul acestui studiu au avut ca matrice rășina epoxidică. Ca elemente de armare au fost utilizate: pulbere aramidică și fibre scurte de carbon. În cazul compozitelor cu fibre scurte de carbon a fost necesară o evaluare a agenților de dispersie. Prin urmare a fost efectuat un studiu mai detaliat a compozitelor cu diferite concentrații de dispersant.

2.1. Etapele formării materialelor compozite cu matrice epoxidică

Pentru formarea materialelor au fost parcurse câteva etape:

1. determinarea metodei de formare a compozitelor;
2. pregătirea matriței;
3. aditivarea rășinii epoxidice;
4. analiza compatibilității dintre matricea bicomponentă și elementele de armare;
5. identificarea influenței concentrației de aditiv utilizat ca dispersant;
6. decuparea epruvetelor pentru identificarea anumitor proprietăți.

2.1.1. Determinarea metodei de formare a compozitelor

Pentru formarea materialelor compozite cu matrice termorigidă au fost folosite metode clasice și anume metoda prin turnare și prin adsorbție. Un element esențial în selecția metodei de formare este costul aferent procesului, astfel s-a optat pentru tehnologii mai ieftine dar performante pentru laborator.

2.1.2. Analiza compatibilității dintre matricea bicomponentă și elementele de armare

În cazul compozitului cu pulbere aramidică, elementele de bază s-au dovedit a fi compatibile chimic. Datorită acestei compatibilități dispersia aditivului în matrice a fost omogenă chiar și la concentrații mari de 50% volum. Starea neprelucrată a pulberii aramidice formează o bună adeziune cu matricea epoxidică, legături ce sunt mult mai slabe în cazul armării rășinii cu fibre scurte de carbon, datorită tratamentului de suprafață a fibrelor, făcut cu scopul de a ține filamentele unite. Incompatibilitatea fibrelor scurte de carbon vine și din vâscozitatea pre-polimerului.

Soluția acestei probleme a fost utilizarea unui agent de dispersie. Au fost studiate mai multe tipuri de pulberi cu proprietăți de dispersant (argilă, amidon, titați etc.) în [47], [48], [49], [50].

2.1.3. Utilizarea pulberii de argilă ca agent de dispersie

În prezent, compozitele polimer-argile sunt larg utilizate în industria automobilistică. Argilele sub formă de nanoparticule provoacă o creștere semnificativă a durității materialelor și o scădere importantă a greutateii lor. Ele prezintă structuri stratificate și pot fi folosite sub formă de nanoparticule de ranforsare a polimerilor în vederea obținerii de nanocompozite performante, cu preț și greutate scăzute [51], [52], [53].

Pulberea de argila este cunoscută datorită abilității de a genera nanostructuri în interiorul matricei. Fiecare nano-placă de argilă schimbă la nivel local structura polimerului. Această structură cristalină nou formată are efect asupra proprietăților mecanice ca urmare a transferului efortului dintre faza cristalină și cea amorfă. Ca agent de dispersie, argila a fost utilizată în formarea materialelor din studiile [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60].

2.2. Metode experimentale de evaluare a proprietăților compozitelor formate

2.2.1. Determinarea proprietăților tribologice (știft pe disc, bloc pe inel)

Pentru determinarea proprietăților tribologice a fost utilizat Tribotester Universal UMT2. Pe echipamentul UMT-2 (CETR®, SUA), a fost montat modulul dedicat testelor tribologice de tip *știft pe disc* și *bloc pe inel*.

Pentru evaluarea pierderilor de masă în timpul testelor de frecare și de uzură abrazivă, a fost folosită o balanță analitică METTLER TOLEDO și cu precizie de 0.1 mg.

2.2.2. Determinarea proprietăților mecanice (la încovoiere și la compresiune)

Încovoiere

Încercările pentru determinarea caracteristicilor la încovoiere statică sunt reglementate de ASTM D 790 și ISO 178, SR EN ISO 14125, unde sunt definite epruvete standardizate, precum și parametrii pentru alte dimensiuni de epruvete utilizate atunci când este cazul. Testele au fost făcute cu ajutorul aparatului universal Testometric M 350 5K. Determinarea și analiza proprietăților mecanice la încovoiere este reprezentată în studiile [61], [55].

Compresiune

Pentru determinarea comportamentului la compresiune a fost utilizat același aparat universal Testometric M 350 5K. Testele de compresiune au fost făcute conform standardului ASTM D695.

2.2.3. Determinarea proprietăților termice

Compozitele formate au fost caracterizate din punct de vedere termic, prin determinarea coeficientului de dilatare, căldurii specifice și conductivității termice.

Dilatarea termică

Pentru măsurarea coeficientului de dilatare a fost folosit un analizator termo-mecanic TMA-SDTA 840, metoda fiind reglementată de ASTM E 831. Studii similare de determinare a proprietăților termice au fost făcute în [62], [55], [60], [63].

Căldura specifică

Căldura specifică a materialelor formate a fost determinată cu ajutorul DSC-ului (Calorimetru cu scanare diferențială) [64], [65], [66], [67]. Metoda de determinare a căldurii specifice este reglementată de ASTM E 2070.

Conductivitatea termică

DSC-ul ne da posibilitatea de a determina conductivitatea termică a polimerilor printr-o metodă simplă cu o precizie de la $\pm 10\%$ la $\pm 20\%$. Această metodă se folosește la ora actuală la determinarea conductivității termice pentru materialele compozite [68], [67]. Studii asupra conductivității termice au fost făcute în studiile [69], [70], [71], [72] și [73].

2.2.4. Rezolvarea unei probleme folosind rețele neuronale

Rezolvarea clasică (cu algoritmi bine precizați pentru fiecare clasă de probleme) a problemelor necesită cunoașterea a suficiente date despre problemă pentru a o putea descompune în unități logice elementare și pentru a elabora un algoritm care va rămâne "înghețat" în structura lui, modificându-se doar datele pe care le prelucrează [74], [75], [76].

Dacă datele despre problemă nu sunt suficiente atunci problema nu poate fi formalizată și metoda de mai sus nu poate fi aplicată. În aceste situații pot fi utilizate rețelele neuronale, etapele de rezolvare fiind [77], [78], [79], [80]:

- 1.** Stabilirea unei arhitecturi inițiale care să fie compatibilă cu problema (de exemplu structura nivelului de intrare în rețea trebuie să fie compatibilă cu numărul de date inițiale ale problemei) și alegerea tipului de unități funcționale [81], [82].
- 2.** Alegerea unui algoritm de învățare potrivit cu arhitectura rețelei și cu cantitatea de informație de care se dispune despre problemă [83];
- 3.** Antrenarea rețelei pentru a rezolva o anumită problemă. Antrenarea se realizează prin "amplasarea" rețelei în "mediul informațional" specific problemei și activarea algoritmului de învățare.
- 4.** Testarea (validarea) rețelei presupune verificarea corectitudinii răspunsurilor pe care le dă rețeaua când primește date de intrare care nu aparțin setului de antrenare dar pentru care se cunoaște răspunsul corect [84].
- 5.** Utilizarea propriu-zisă a rețelei.

Primele două etape se referă la proiectarea rețelei iar celelalte la adaptarea (antrenarea) și utilizarea ei. O etapă premergătoare reprezintă preprocesarea datelor.

2.3.Evaluarea proprietăților compozitelor armate cu argilă în A, în B și în amestecul prepolimeric (clasa de compozite ABP)

După cum s-a menționat anterior, pentru identificarea agentului de dispersie au fost parcurse două etape.

În prima etapă au fost formate compozite aditivare cu 2% pulbere de argilă, dispersate în componenta A (mai vâscoasă), în componenta B (cu vâscozitate mai mică) și în amestecul prepolimeric (Tabelul 1). Au fost formate câte trei materiale de fiecare tip de compozit, pentru a avea posibilitatea de a extrage epruvetele necesare testării acestora.

Tabelul 1 Tipul și modul de aditivare cu argilă a rășinii epoxidice

Compozit	Codificarea	Aditivul adăugat în:
Rășină epoxidică aditivată cu argilă	Ar_A	Componenta A
	Ar_B	Componenta B
	Ar_P	Amestec nepolimerizat A+B

Pentru identificarea modului de dispersie a pulberii de argilă în compozitele formate, au fost evaluate proprietățile tribologice, mecanice (la încovoiere) și termice. Studii similare au fost făcute și asupra altor aditivi cu proprietăți bune de dispersant (amidon) [85]. Cu ajutorul rețelelor neuronale artificiale valorile proprietăților au fost optimizate.

2.3.1. Analiza rezultatelor privind comportamentul tribologic a clasei de compozite ABP

Pentru evaluarea coeficientului de frecare a fost utilizată metoda *știft pe disc*, știftul din material compozit cu discul din oțel. Au fost stabilite condițiile de testare: timpul de alunecare $t=1800s$, forța normală aplicată știftului $F_N=10N$, distanța parcursă $d=1700m$ și viteza de alunecare $v=0.942m/s$. Pentru fiecare tip de compozit au fost testate trei epruvete [49].

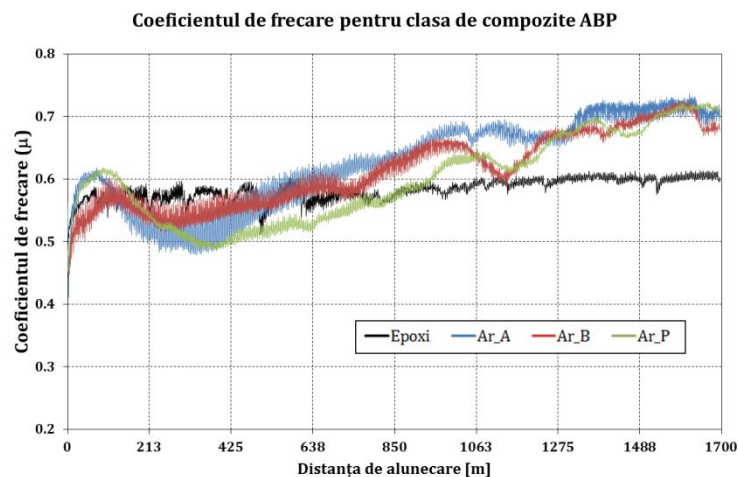


Figura 2-1 Coeficientul de frecare a clasei de compozite ABP

Variația coeficientului de frecare pe distanța menționată pentru compozitele ABP sunt reprezentate în Figura 2-1. Comparativ cu rășina epoxidică, variația valorilor coeficientului de frecare la compozite a avut o amplitudine mai mare. Până în 500m s-a considerat adaptarea contactului dintre materiale – rodajul. După rodaj, coeficientul de frecare se stabilizează pe intervalul de 500 – 1700m, astfel, a fost luată în calcul valoarea medie a coeficientului de frecare pe această distanță. Valorile medii ale coeficienților de frecare au fost utilizate ulterior ca unități de intrare în elaborarea unui model decizional cu ajutorul rețelelor neuronale.

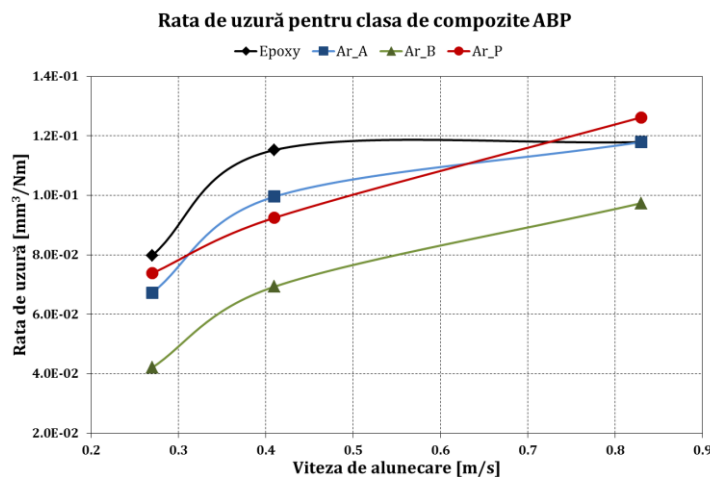


Figura 2-2 Rata de uzură a clasei de compozite ABP

Pentru evaluarea ratei de uzură a fost utilizată metoda *știft pe disc*, știft de polimer pe disc abraziv. Au fost stabilite următoarele condiții de testare: distanța parcursă $d=50\text{m}$, viteza de alunecare $v_1=0.27\text{m/s}$, $v_2=0.41\text{m/s}$ și $v_3=0.83\text{m/s}$, forța normală aplicată știftului fiind $F_N=2\text{N}$. Epruvetele au fost cântărite înainte și după test, stabilindu-se astfel pierderea de masă și respectiv rata de uzură. Rata de uzură a avut o tendință crescătoare odată cu creșterea vitezei de testare, caracteristic materialelor termorigide (Figura 2-2).

2.3.2. Analiza rezultatelor experimentale privind proprietățile mecanice a clasei de compozite ABP

Pentru evaluarea proprietăților mecanice, toate materialele formate au fost supuse testului de încovoiere în trei puncte conform metodei explicate în subcapitolul 2.5.2. Pentru fiecare compozit au fost testate câte cinci epruvete.

Au fost analizate trei proprietăți aferente testului și anume: modulul de elasticitate la încovoiere, tensiunea la rupere și energia la rupere. Aceste proprietăți au fost ulterior utilizare ca unități de intrare în rețeaua neuronală.

2.3.3. Analiza rezultatelor experimentale privind proprietățile termice a clasei de compozite ABP

Metoda de măsurare a coeficientului de dilatare a constat în încălzirea epruvetelor de la 30°C la 150°C , cu o rată termică de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Intervalul de temperatură pentru determinarea coeficientului de dilatare a fost ales 90°C - 140°C (Figura 2-3), zonă de liniaritate imediat după temperatura de tranziție sticloasă. Pentru fiecare tip de material au fost testate trei epruvete.

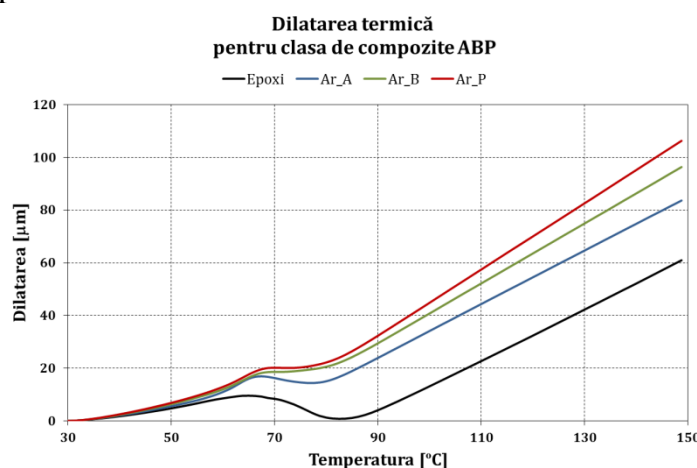


Figura 2-3 Dilatarea termică a clasei de compozite ABP

Pentru determinarea căldurii specifice compozitele ABP au fost încălzite de la 30°-160°C cu o rată termică de 15°C/min și răcite cu aceeași rată. Intervalul de interes (zona liniară) pentru determinarea căldurii specifice a fost 100°-60°C a termogramei, pe curba de răcire (Figura 2-4). Pentru fiecare concentrație au fost testate trei epruvete, deci căldura specifică din Figura 2-4 reprezintă media a trei valori pe intervalul de temperatură indicat.

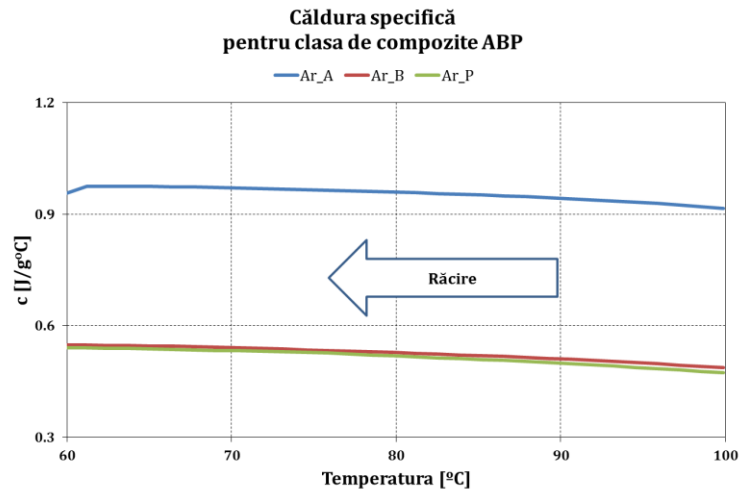


Figura 2-4 Căldura specifică a clasei de compozite ABP

Valorile proprietăților termice au fost utilizate în modelul decizional ANN, ca unități de intrare.

2.3.4. Utilizarea rețelelor neuronale pentru alegerea modului de dispersie a argilei în rășina epoxidică

Rețeaua neuronală formată a fost de tipul backpropagation. Ca unități de intrare au fost utilizate proprietățile măsurate: coeficientul de frecare, rata de uzură (v_1 , v_2 și v_3), modulul de elasticitate la încovoiere, tensiunea la rupere, energia la rupere, căldura specifică și coeficientul de dilatare termică. Toate datele de intrare au fost de tip real, urmate de trei nivele de unități ascunse cu 17 noduri (neuroni). Ca unități de ieșire au fost setate tipurile de amestec ale argilei în rășina epoxidică – trei unități de ieșire de tip boolean.

EasyNN oferă două posibilități de ierarhizare a influențelor asupra ieșirilor. Prima, analiza importanței, se bazează pe compararea sumelor ponderilor sinaptice ce pornesc de la fiecare neuron de intrare către primul strat ascuns [86]. Intrarea cu suma de ponderi cu cea mare valoare va avea cea mai mare influență asupra ieșirii. Astfel a fost stabilită influența relativă pentru fiecare subrețea (R1, R2 și R3). Se observă din Figura 2-5 că modulul de elasticitate, căldura specifică, tensiunea la rupere și coeficientul de frecare sunt proprietățile cu ponderea cea mai mare pentru toate cele trei subrețele. Variația importanței relative este mică, reprezentată valoric în Figura 2-5.

Cea de-a doua metodă oferită de EasyNN, analiza sensibilității, are la bază aprecierea nivelului de variație a ieșirii atunci când valoarea fiecărei intrări este variată de la minimum la maximum. Se stabilește în acest mod intrarea a cărei modificare are maximum de efect asupra ieșirii. Astfel a fost stabilită sensibilitatea relativă pentru fiecare subrețea (R1, R2 și R3) Se observă din Figura 2-6 că modulul de elasticitate, căldura specifică, tensiunea la rupere și coeficientul de frecare sunt proprietățile cu ponderea cea mai mare pentru toate cele trei subrețele. Variația importanței relative este mică, reprezentată valoric în Figura 2-6.

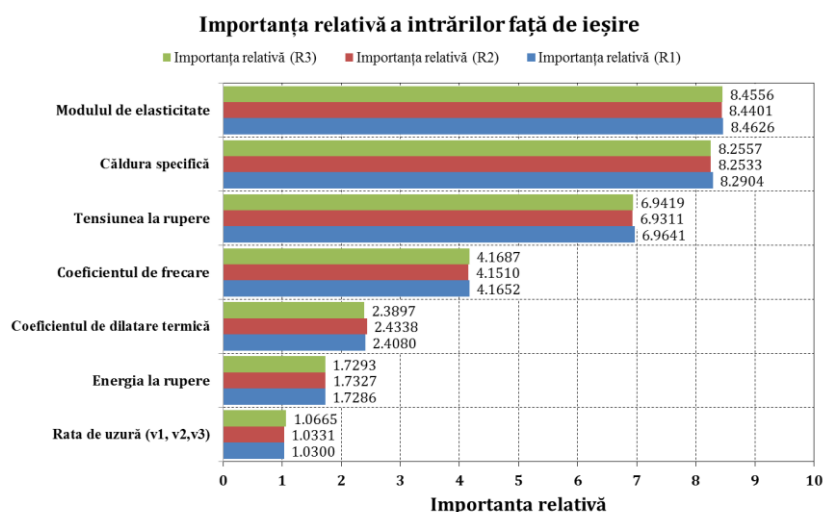


Figura 2-5 Importanța relativă a intrărilor față de ieșiri (pentru alegerea ordinii de amestec)

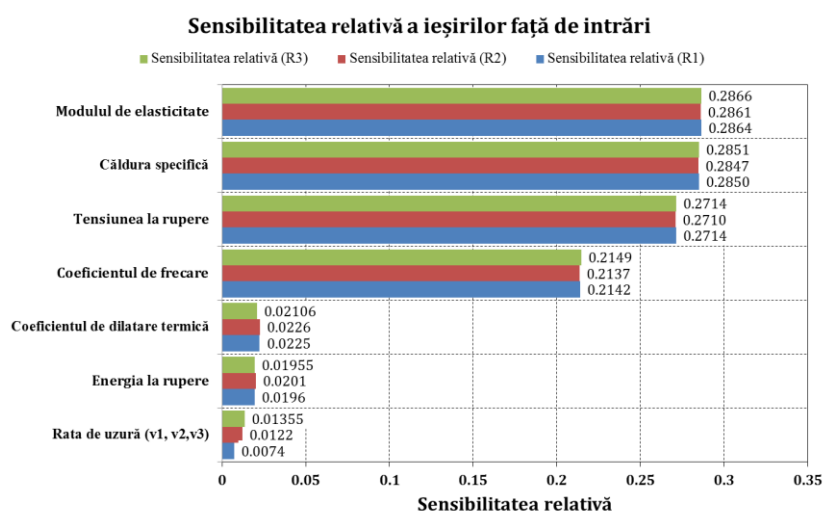


Figura 2-6 Sensibilitatea relativă a ieșirilor față de intrări (pentru alegerea ordinii de amestec)

Cele două metode de analiză oferă aceeași ierarhie. Cei mai importanți factori de influență asupra modelului decizional sunt: modulul de elasticitate, căldura specifică, tensiunea la rupere și coeficientul de frecare (Figura 2-5 și Figura 2-6).

Conform modelului creat rezultă că utilizarea amestecului de tip P este cel mai potrivit în cazul pulberii de argilă. Dispersia pulberii în amestecul prepolimeric asigură o distribuție mai omogenă a aditivului în matrice.

2.4. Evaluarea proprietăților compozitelor armate cu diferite concentrații de argilă

După stabilirea tipului de amestec, implicit a fost necesar identificarea concentrației optime la care proprietățile de bază ale rășinii nu se modifică semnificativ. Astfel, au fost formate compozite aditivate cu mai multe concentrații de argilă, după cum se vede în Tabelul 2. După același scenariu au fost alese tipul și concentrațiile de amestec pentru compozitele cu pulbere de amidon în studiile [48], [85], [87], însă mecanismul decizional cu ajutorul rețelelor neuronale artificiale a fost pentru prima dată utilizat în cazul pulberii de argilă.

Tabloul 2 Compozite formate cu diferite concentrații de argilă

Rețeta de formare	Numele materialului compozit	Raport masic aditiv/rășină
Rășină epoxidică	Ar0	0%
Rășină epoxidică aditivată cu argilă	Ar1	1%
	Ar2	2%
	Ar3	3%
	Ar4	4%
	Ar5	5%
	Ar7	7%
	Ar9	9%
	Ar10	10%
	Ar11	11%
	Ar13	13%
	Ar15	15%
	Ar20	20%
	Ar25	25%
	Ar30	30%

Pulberea de argilă a fost dispersată în amestecul prepolimeric al rășinii epoxidice bi-componente. După formarea acestor materiale compozite, cu ajutorul mașinii de debitat cu apă au fost tăiate epruvete pentru analiza anumitor proprietăți. Astfel, materialele formate au fost testate pentru evaluarea proprietăților mecanice, termice și tribologice.

Rezultatele obținute pentru proprietățile acestei familii de materiale au stat la baza unui alt model decizional ANN. Au fost analizate aceleași proprietăți ca și în cazul clasei de compozite ABP.

2.4.1. Analiza rezultatelor privind comportarea tribologică a compozitelor aditivate cu diferite concentrații de argilă

Pentru evaluarea comportamentului tribologic a fost utilizată metoda *știft pe disc*, cu știft de polimer și disc de oțel. Parametrii de testare atât pentru coeficientul de frecare, cât și pentru rata de uzură au fost aceiași ca și în cazul clasei de compozite ABP (subcapitolul 2.6.1 al tezei), de asemenea și numărul de epruvete testate. Valorile medii obținute în urma testelor tribologice pentru familia de compozite studiate au fost reprezentate relativ la valoarea medie a rășinii neaditivate. Ținând cont de scopul aditivării cu mai multe concentrații, pentru identificarea agentului de dispersie, a fost necesar studiul variației relative minime față de rășina epoxidică.

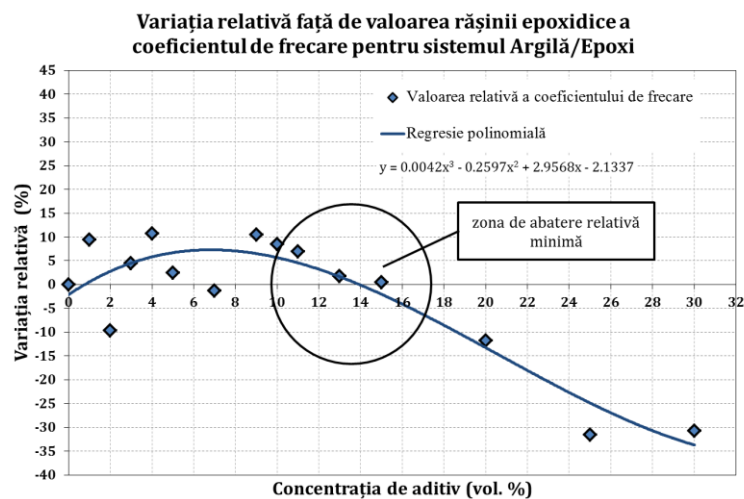


Figura 2-7 Variația relativă față de valoarea rășinii epoxidice a coeficientului de frecare pentru compozitele aditivare cu mai multe concentrații de argilă

În analiza coeficientului de frecare se observă o îmbunătățire față de valoarea rășinii epoxidice cu aproximativ 30% în cazul concentrației de 25% și 30% pulbere de argilă. Coeficient de frecare cu variație relativă mai mică față de valoarea rășinii epoxidice este în cazul concentrațiilor cuprinse între 9% – 15% de argilă, identificată în Figura 2-7 ca zonă de abatere relativă minimă.

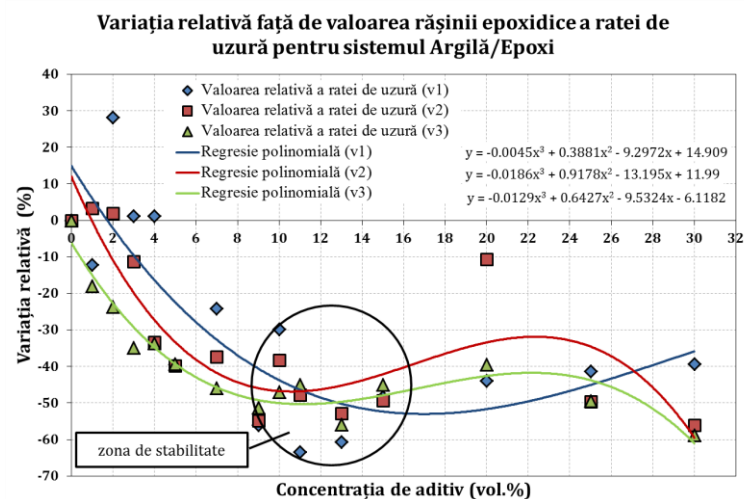


Figura 2-8 Variația relativă față de valorile rășinii epoxidice a ratelor de uzură pentru compozitele aditivare cu mai multe concentrații de argilă

În cazul testelor de uzură prin abraziune se observă o rată de uzură mai mică a compozitelor față de rășina epoxidică pentru concentrațiile mai mari de 5% (Figura 2-8). Astfel, a fost urmărită cea mai mică variație a ratelor de uzură din punct de vedere ai parametrilor de testare. Zona de stabilitate a ratei de uzură indică dispersia omogenă a pulberii de argilă în matrice. Aceasta zona a fost identificată între concentrațiile de 8% – 15% (Figura 2-8).

Valorile medii ale proprietăților tribologice evaluate au fost utilizate ca unități de intrare în modelul decizional ANN.

2.4.2. Analiza mecanică a compozitelor aditivate cu diferite concentrații de argilă.

Pentru evaluarea proprietăților mecanice materialele au fost testate la încovoiere în trei puncte. Parametrii de testare au fost ca și în cazul clasei de compozite ABP (subcapitolul 2.5.2), de asemenea și numărul de epruvete testate. Principalele proprietăți mecanice analizate au fost: tensiunea la rupere, modulul de elasticitate la încovoiere și energia la rupere.

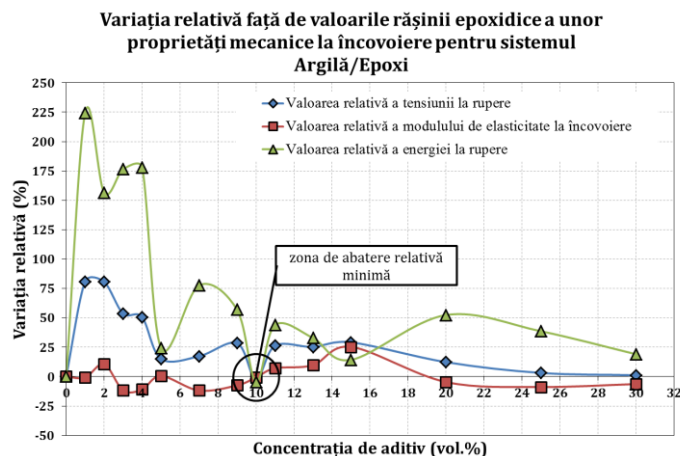


Figura 2-9 Variația relativă față de valorile rășinii epoxidice a proprietăților mecanice pentru compozitele aditivate cu mai multe concentrații de argilă

Reprezentarea variației relative față de valorile rășinii neaditivate a proprietăților mecanice indică un minim al abaterii relative în cazul concentrației de 10% argilă (Figura 2-9). Deci putem concluziona că prin aditivarea cu 10% rație volumică de argilă, comportamentul mecanic al compozitului rășină + argilă nu se modifică semnificativ față de rășina epoxidică. Ceea ce face ca această concentrație să fie bună, din punct de vedere mecanic, în utilizarea argilei ca agent de dispersie.

Valorile medii ale proprietăților mecanice au fost utilizate ca unități de intrare în modelul decizional ANN.

2.4.3. Analiza proprietăților termice a compozitelor aditivate cu diferite concentrații de argilă

În cazul acestor compozite au fost analizate proprietățile: coeficientul de dilatare termică și căldura specifică, considerate proprietăți termice de bază. Condițiile de testare pentru determinarea coeficientului de dilatare termică a fost aceleași ca și în cazul clasei de compozite ABP (subcapitolul 2.6.3), de asemenea și numărul de epruvete testate. Datorită faptului ca argila are o stabilitate termică bună, adăugarea ei în rășină epoxidică induce compozitului un coeficient de dilatare termic mai mic comparativ cu rășina neaditivată.

Materialele formate au fost supuse unui tratament termic conform programului: au fost încălzite de la 30°-120°C cu o rată de încălzire de 10°C/min. Intervalul de interes pentru determinarea căldurii specifice a fost 70°-110°C a termogramei. Pentru fiecare concentrație au fost testate 3 epruvete. Ca și în cazul celorlalte proprietăți a fost stabilită zonă de abatere minimă față de valorile rășinii neaditivate. Aceasta se află în jurul concentrațiilor de 9%, 10% și 11%. Intervalul de concentrații 0 – 8% pulbere de argilă se caracterizează printr-o instabilitate a proprietăților termice evaluate. Intervalul de concentrație 10 – 30% pulbere de argilă are o tendință de stabilizare, obținându-se valori mai mici față de rășina neaditivată. Valorile medii ale proprietăților termice studiate au fost utilizate ca unități de intrare în modelul decizional ANN.

2.4.4. Utilizarea rețelelor neuronale pentru alegerea concentrației de argilă la care proprietățile de bază a rășinii nu se modifică semnificativ

Pentru crearea unui model decizional în ceea ce privește concentrația optimă de argilă la care proprietățile de bază ale rășinii epoxidice nu se modifică semnificativ, a fost utilizată rețeaua de tip backpropagation, la fel ca și în cazul deciziei ordinii de amestec.

Ca unități de intrare au fost utilizate valorile proprietăților măsurate și analizate anterior, la ieșire – concentrația de aditiv. Astfel, rețeaua a fost cu nouă noduri la intrare și un nod de ieșire. Utilizând pachetul software EasyNN a fost obținută arhitectura optimizată a rețelei neuronale cu 16 noduri ascunse interconectate.

Ca și în cazul modelului anterior au fost analizate importanța și sensibilitatea relativă (Figura 2-10 și Figura 2-11). Influența relativă pentru fiecare subrețea (Rc1, Rc2 și Rc3) este reprezentată în Figura 2-10. Se observă că căldura specifică, coeficientul de frecare și coeficientul de dilatare termică liniară sunt proprietățile cu ponderea cea mai mare pentru toate cele trei subrețele. Variația importanței relative este mică, reprezentată valoric în Figura 2-10.

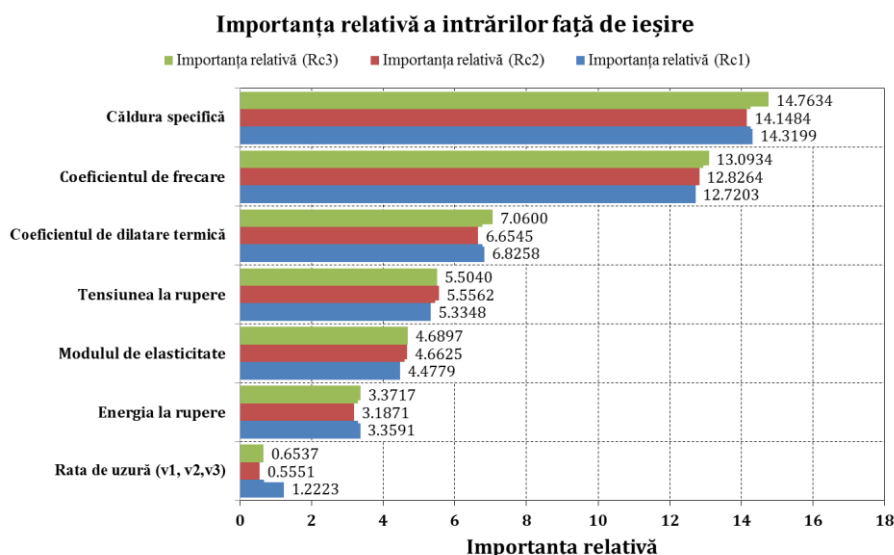


Figura 2-10 Importanța relativă a intrărilor față de ieșiri (pentru alegerea concentrației optime de argilă)

În cazul sensibilității ieșirii față de intrare valorile obținute sunt reprezentate în Figura 2-11. Sensibilitatea cea mai mare o au valorile căldurii specifice, coeficientului de dilatare termică liniară și a modulului de elasticitate.

După antrenare, rețeaua a fost interogată pentru identificarea concentrației de argilă care prin aditivarea în rășina epoxidică să nu modifice semnificativ proprietățile mecanice, termice și tribologice ale rășinii neaditivate. Astfel, ca date de interogare au fost proprietățile determinate ale rășinii neaditivate, oferindu-ne ca răspuns concentrația de 10.19 % rație volumică pentru prima subrețea, 10.38% –a doua subrețea și 10.20% – a treia subrețea.

Datorită faptului că a fost formată și concentrația de 10% pulbere de argilă cu rășină epoxidică, modelul ANN a fost validat.

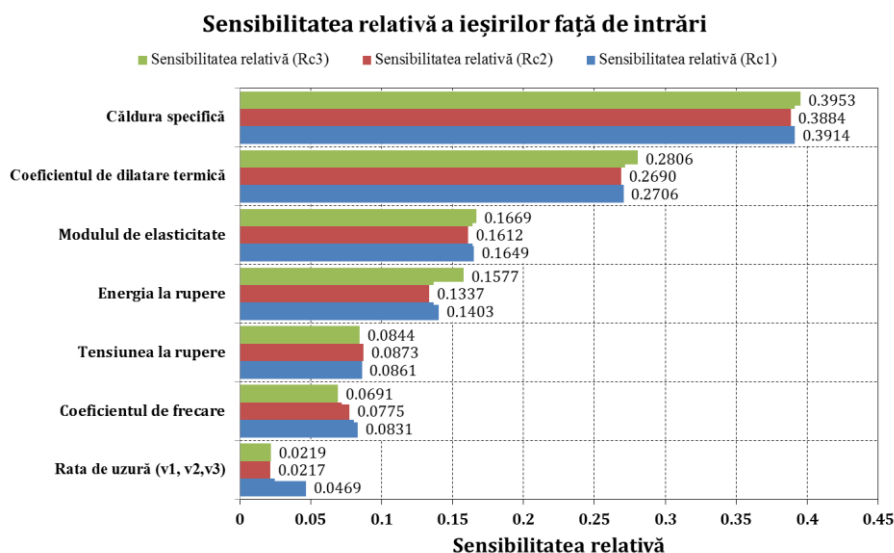


Figura 2-11 Sensibilitatea relativă a ieșirilor față de intrări (pentru alegerea concentrației optime de argilă)

2.5. Materiale compozite formate pentru acest studiu

După stabilirea tipului de amestec și a concentrației optime de argilă au fost formate două clase de materiale compozite (Tabelul 3):

- I. Clasa de materiale cu compozite epoxidice aditivate cu pulbere aramidică: rășină epoxidică; 2. – 4. rășină epoxidică aditivată cu pulbere aramidică (5%, 15% și 25% vol.);
- II. Clasa de materiale cu compozite epoxidice aditivate cu 10% pulbere de argilă și armate cu fibre scurte de carbon 5. rășină epoxidică aditivată cu 10% argilă; 6. – 8. rășină epoxidică aditivată cu 10% argilă și armată cu fibre scurte de carbon (5%, 15% și 25% vol.).

Tabelul 3 Materiale compozite formate cu pulbere aramidică și cu fibre scurte de carbon

Materialele compozite formate			
Clasa de materiale compozite aditivate cu pulbere aramidică		Clasa de materiale compozite aditivate cu 10% pulbere de argilă și armate cu fibre scurte de carbon	
1. Rășină Epoxidică		5. Rășină Epoxidică + 10% Argilă	
2. – 4. Pulbere aramidică	5%	6. – 8. Fibre scurte de carbon	5%

2.6. Concluzii

1. În procesul de formare a materialelor compozite au fost formulate anumite concluzii:
 - dispersia foarte bună la concentrații mari de pulbere aramidică în matricea epoxidică;
 - incompatibilitatea fibrelor scurte de carbon cu matricea epoxidică, manifestată prin aglomerări și sedimentări;
 - agentul de dispersie compatibil atât cu matricea cât și cu elementul de armare este pulberea de argilă, adăugat în amestecul prepolimeric.

2. După identificarea agentului de dispersie au fost formate și testate două clase de compozite cu matrice epoxidică și ca aditiv, agentul de dispersie – argila. Prima clasă a avut ca scop determinarea modului de dispersie (clasa compozitelor ABP), a doua clasă pentru determinarea concentrației optime de argilă la care proprietățile de bază ale rășinii nu se modifică semnificativ.

După testarea clasei de compozite ABP au fost desprinse o serie de concluzii:

- în evaluarea parametrilor tribologici, pe parcursul testării, pentru compozite coeficientul de frecare a avut o amplitudine mai mare a variației față de rășina epoxidică, înregistrând valori între 0.4 și 0.7;
- în ceea ce privește rata de uzură a fost observată tendința crescătoare odată cu creșterea vitezei de testare, caracteristic materialelor compozite termorigide (Figura 2-2);
- rețeaua neuronală artificială s-a dovedit a fi un instrument decizional foarte bun în alegerea ordinii de amestec;
- astfel, cel mai potrivit mod de dispersie a argilei în matricea epoxidică este în amestecul prepolimeric.

După testarea compozitelor cu mai multe concentrații de argilă se evidențiază:

- în analiza coeficientului de frecare se observă o îmbunătățire față de rășina epoxidică în cazul concentrației de 20%, 25%, și 30%. Un comportament cu variație relativă mai mică a rezultat în cazul concentrațiilor cuprinse între 9–15%;
- în cazul testelor de uzură se observă o rată de uzură mai mică față de rășina epoxidică pentru majoritatea compozitelor;
- variația relativă a proprietăților mecanice indică un minim în cazul concentrației de 10% argilă;
- pentru proprietățile termice măsurate variația minimă a fost înregistrată pentru compozitele cu concentrația de 9%, 10% și 13%;
- rețeaua neuronală artificială s-a dovedit a fi un instrument decizional eficient în identificarea concentrației optime de argilă la care proprietățile de bază ale rășinii nu se modifică semnificativ, astfel a fost obținută valoarea medie de 10.25% argilă.

Concluziile desprinse din studiul capitolului doi motivează utilizarea argilei ca agent de dispersie în proporție de 10% volum pentru fibrele scurte de carbon în matricea epoxidică, în condițiile în care agentul de dispersie este amestecat în prepolimer. Mai mult ca atât, utilizarea rețelelor neuronale artificiale s-a dovedit a fi una foarte eficientă pentru crearea de modele decizionale în domeniul compozitelor polimerice.

3. Analiza proprietăților tribologice ale compozitelor cu matrice epoxidică

3.1. Evaluarea proprietăților tribologice ale compozitelor formate prin testului bloc pe inel

Testele tribologice au fost făcute cu ajutorul Tribometrului UMT-2 (CETR[®], USA) pe modulul *bloc pe inel*. În cazul acestui tip de cuplu, blocul a fost din polimer sau compozit polimeric și inelul din oțel. Softul de control aferent aparatului de testare permite variația forței de încărcare, a viteza de alunecare, timpul de testare și ca răspuns, achiziționarea datelor de ieșire (forța de frecare, uzura liniară).

Testele tribologice au fost făcute conform programului din Tabelul 4. Pentru setarea parametrilor de testare au fost făcute încercări premergătoare pentru stabilirea anumitor

limite de lucru, care să permită caracterizarea întregii clase de compozite. Parametrii stabiliți au fost: viteză inferioară de testare 0.75m/s și superioară de 1.1m/s, cu forțe de încărcare: inferioară – 7.5N și respectiv superioară – 15N. Pentru fiecare compozit format au fost testate câte 5 epruvete.

Tabelul 4 Parametrii de testare utilizați pentru caracterizarea tribologică

Viteza ($\pm 3\%$) [m/s]	Turația [rot/min]	Forța ($\pm 5\%$) [N]		Timp [min]	Distanță [m]
0.75	413	7.5	15	33	1500
1.11	620	7.5	15	22	

3.1.1. Analiza comportării tribologice *bloc pe inel* a rășinii epoxidice neaditivate comparativ cu rășina epoxidică aditivată cu 10% vol. de argilă

Analiza comportării tribologice a rășinii epoxidice comparativ cu compozitul epoxidic aditivat cu 10% pulbere de argilă a fost făcută din perspectiva parametrilor de testare. Într-o primă fază, au fost comparate evoluția coeficientului de frecare și a uzurii liniare pentru fiecare set de parametri.

Datele obținute pentru fiecare parametru de testare au fost centralizate pentru a fi identificate următoarele influențe:

- influența forței asupra coeficientului de frecare;
- influența vitezei de alunecare asupra coeficientului de frecare.

Pentru identificarea influenței forței asupra coeficientului de frecare, se compară testele cu aceleași viteze și forțe diferite (Figura 3-1).

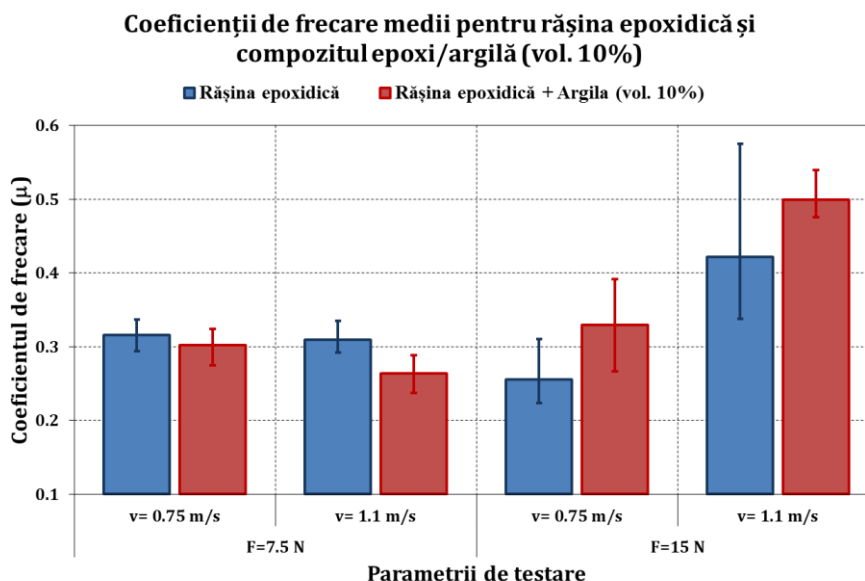


Figura 3-1 Coeficienții de frecare medii pentru rășina epoxidică și compozitul epoxi/argilă (vol. 10%)

Pe parcursul testelor a fost monitorizată uzura liniară, ceea ce a permis calculul intensității uzurii liniare specifice (Figura 3-2).

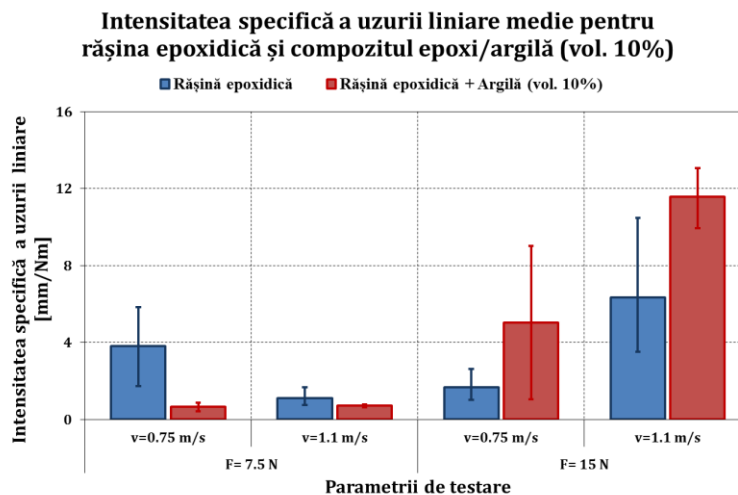


Figura 3-2 Intensitatea uzurii liniare specifice medie pentru rășina epoxidică și compozitul epoxi/argilă (vol. 10%)

3.1.2. Analiza comportării tribologice bloc pe inel a rășinii epoxidice aditivate cu pulbere aramidică.

Analiza influenței forței de încărcare asupra coeficientului de frecare poate fi desprinsă din Figura 3-3. Se observă că pentru viteza de alunecare de 0.75m/s, odată cu creșterea forței de încărcare, coeficientul de frecare scade, fenomen explicat prin apariția particulelor de uzură care joacă rolul de lubrifianți solizi și din cauza creșterii gradului de adaptare la forma piesei dure. Pentru viteza de 1.1m/s se remarcă creșterea coeficientului de frecare odată cu creșterea forței de încărcare pentru rășina epoxidică și compozitele cu 15% și 25% pulbere aramidică. În cazul compozitului cu 5% pulbere aramidică se observă o creștere foarte mică a coeficientului de frecare odată cu creșterea forței de încărcare.

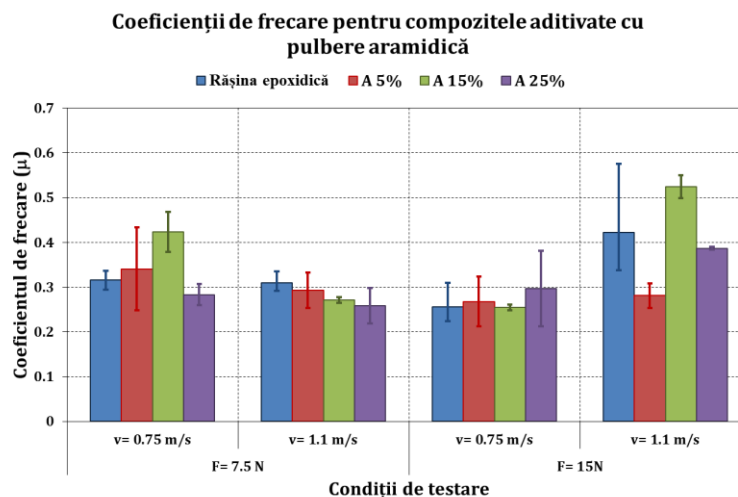


Figura 3-3 Coeficienții de frecare medii pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică

În analiza influenței vitezei de alunecare asupra coeficientului de frecare se observă o scădere a acestuia odată cu creșterea vitezei pentru F=7.5N. La forța de încărcare de 15N coeficientul de frecare crește odată cu creșterea vitezei, presiunea fiind mai mare, suprafața de contact se mărește datorită proprietăților elastoplastice ale compozitelor.

În analiza intensității specifice uzurii liniare medie se observă o ierarhie prezentă pentru primele trei seturi de parametri (Figura 3-4). În toate cazurile pentru rășina epoxidică intensitatea uzurii este mai mare față de compozitul cu 5% pulbere aramidică.

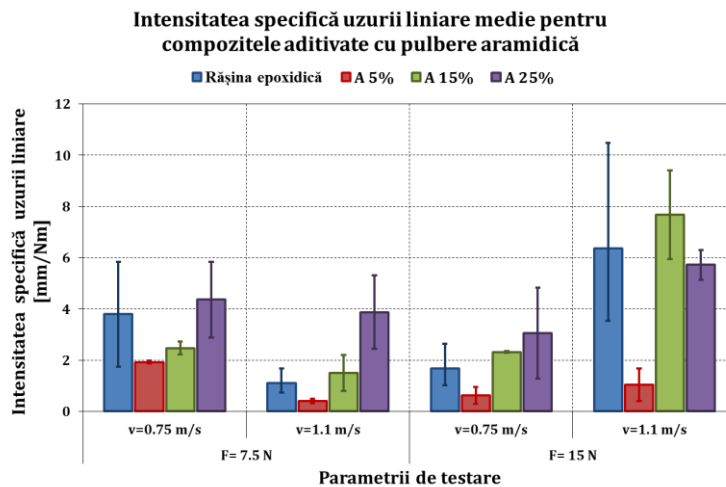


Figura 3-4 Intensitatea uzurii liniare specifice medie pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică

3.1.3. Analiza comportării tribologice bloc pe inel a rășinii epoxidice armate cu fibre scurte de carbon

Proprietățile tribologice ale compozitelor armate cu fibre scurte de carbon au fost raportate la rășina epoxidică aditivată cu 10% vol. pulbere de argilă.

Pentru identificarea influenței vitezei de alunecare asupra coeficientului de frecare, se analizează valorile medii ale coeficientului de frecare pe intervalul 500 – 1500m pentru cele două forțe de încărcare utilizate, de 7.5N și 15N (Figura 3-5). Astfel, se observă că la F=7.5N, odată cu creșterea vitezei de alunecare, crește și coeficientul de frecare pentru toate compozitele armate cu fibre scurte de carbon. Iar pentru F=15N, coeficientul de frecare scade odată cu creșterea vitezei. În procesul de frecare, particulele de argilă sunt desprinse din matrice și adunate la muchiile fibrelor. În contact cu oțelul, aceste aglomerări funcționează ca „frâne locale”. Acest fenomen duce la creșterea forței de frecare. Ținând cont și de intensitatea uzurii liniare înregistrate (Figura 3-6), se poate deduce că abia la forță de încărcare mare și viteză de alunecare mare, fibrele scurte de carbon sunt desprinse din matricea epoxidică sporind uzura. Astfel, se obține o micșorare a valorii coeficientului de frecare.

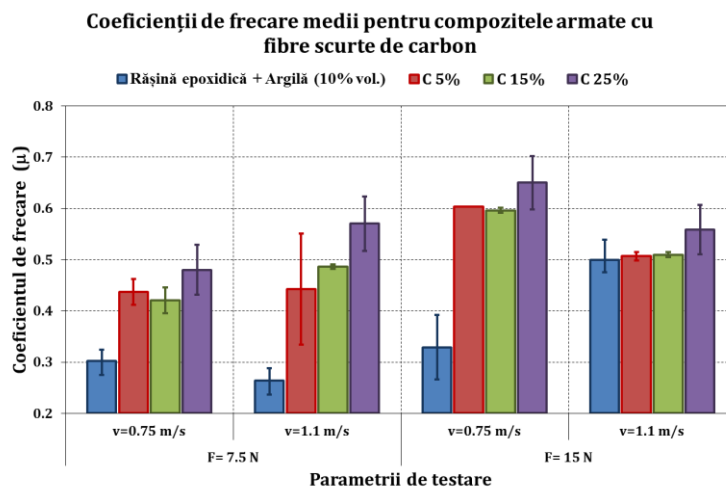


Figura 3-5 Coeficienții de frecare medii pentru compozitele armate cu diferite concentrații de fibre scurte de carbon

Influența forței de încărcare asupra coeficientului de frecare se desprinde din comparația forțelor de încărcare diferite la aceleași viteze de alunecare. Pentru $v=0.75\text{m/s}$, se observă o creștere a coeficientului de frecare cu creșterea forței. La fel se observă și în cazul $v=1.1\text{m/s}$ (Figura 3-5).

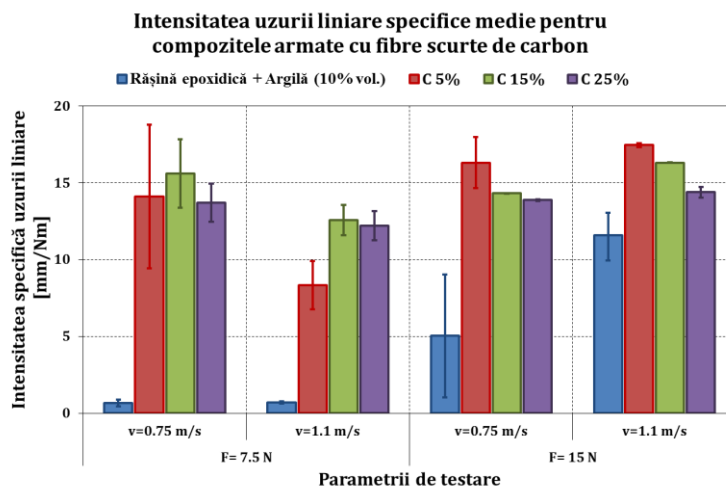


Figura 3-6 Intensitatea uzurii liniare specifică medie pentru compozitele armate cu diferite concentrații de fibre scurte de carbon

3.1.4. Utilizarea rețelelor neuronale artificiale pentru predicția și optimizarea proprietăților tribologice ale compozitelor polimerice

Rezultatele obținute prin testele de frecare *bloc pe inel* au fost utilizate în elaborarea unui model neuronal cu scopul predicției proprietăților tribologice pentru anumite concentrații. De asemenea, modelul permite obținerea concentrațiilor de aditiv pentru anumite proprietăți optimizate.

Ca unități de intrare, au fost selectate concentrațiile fazelor din compozit și puterea mecanică de testare (P1, P2, P3 și P4) obținându-se astfel 8 intrări, iar ca unități de ieșire ale rețelei, au fost selectate valorile medii experimentale ale coeficientului de frecare și ale intensității uzurii liniare specifice, rezultate din testele *bloc pe inel*.

Una dintre principalele etape de construire a unui model neuronal este stabilirea arhitecturii optime a rețelei neuronale utilizate. Fiind o problemă de optimizare, a fost utilizat software-ul bazat pe algoritmi genetici, capabil să ofere soluția optimă pentru arhitectura rețelei. Parametrii de control ai algoritmului genetic sunt prezentați în Tabelul 5 și au fost aleși astfel încât să se obțină un optim între precizie și timp de rulare.

Tabelul 5 Parametrii de control al algoritmului genetic

Parametrul	Valoare	Scop	Valoare	Contribuție la selecție
Populație	50	Abatere pătratică medie	0.01	1/3
Etape de evoluție	1000	Abatere pătratică maximă	0.1	1/3
Rata mutațiilor	0.04	Număr de neuroni	100	1/3
Rata de încrucișare	0.2			
Numărul de selecții optime	10			

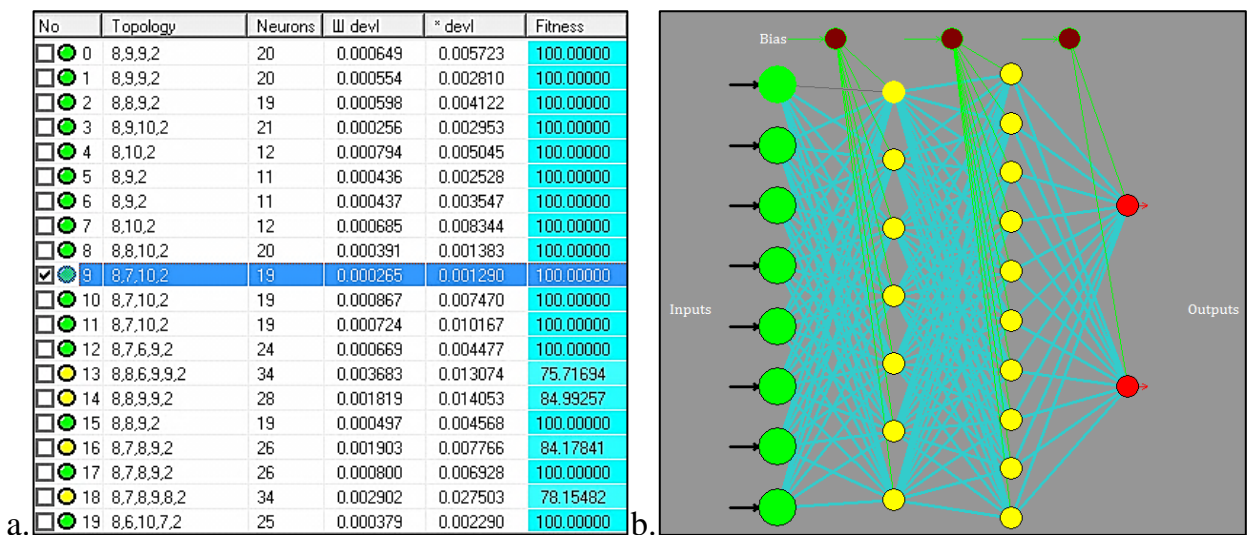


Figura 3-7 Rețeaua neuronală artificială: a. Structura optimizată prin algoritmi genetici; b. Arhitectura rețelei

Rezultatul obținut în urma aplicării algoritmului genetic este reprezentat în Figura 3-7. Se observă în Figura 3-7 (a) că, deși sunt mai multe variante care îndeplinesc condițiile inițiale, doar varianta cu numărul 9 oferă valorile minime pentru abaterile pătratice medii și maxime; ca urmare această topologie va fi aleasă pentru rețeaua modelului neuronal. Astfel, optimul structurii rețelei are două niveluri ascunse, cu 7 și respectiv 10 unități neuronale (Figura 3-7 b).

3.1.4.1. Predicția valorilor de ieșire pentru modelul neuronal artificial

În procesul de antrenare a rețelei neuronale nu a fost introdus compozitul aditivat cu 15% pulbere aramică și compozitul cu 15% fibre scurte de carbon, cu scopul de a valida modelul neuronal. În urma antrenării modelului neuronal, a fost interogată rețeaua pentru compozitele cu concentrațiile de aditiv menționate pentru fiecare subrețea (Rp1, Rp2, Rp3 și Rp4). Erorile relative ale coeficientului de frecare și a intensității uzurii liniare specifice față de valoarea medie experimentală sunt reprezentate în Figura 3-8 pentru fiecare subrețea. Se observă ca valoarea maximă a erorii relative nu depășește 11%. Prin urmare, rețeaua creată poate fi considerată validată.

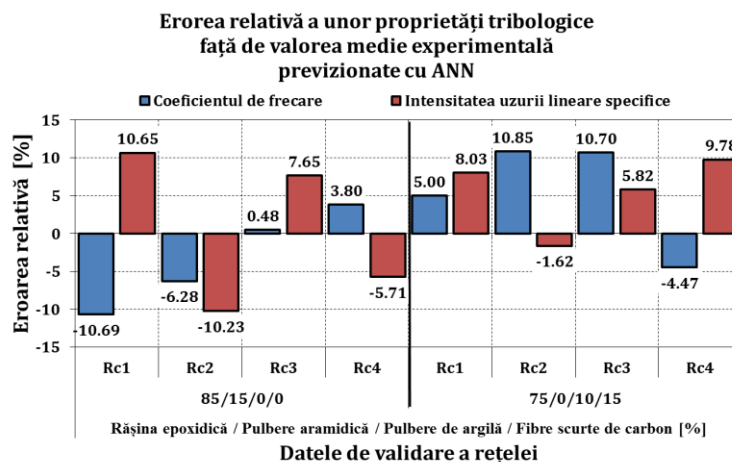


Figura 3-8 Eroarea relativă a proprietăților tribologice previzionate cu ajutorul rețelei neuronale artificiale față de valoarea medie experimentală

3.1.4.2. Analiza interdependenței intrări - ieșiri pentru modelul neuronal artificial

Problematica interdependențelor dintre intrări și ieșiri, în sensul ierarhizării acestora în funcție de gradul de influență asupra ieșirii, a fost tratată pe larg în subcapitolul 2.6.4. Astfel, a fost obținută ierarhia prezentată în Figura 3-9, unde se observă că în cazul puterea mecanică P1, P2 și P3, concentrația de fibre scurte de carbon are influența cea mai mare asupra coeficientului de frecare și a intensității uzurii liniare specifice, urmate de concentrațiile de pulbere aramidică, de concentrația rășinii epoxidice și de concentrația pulberii de argilă. Iar în cazul puterii mecanice P4 importanța cea mai mare este pentru concentrația de pulbere aramidică.

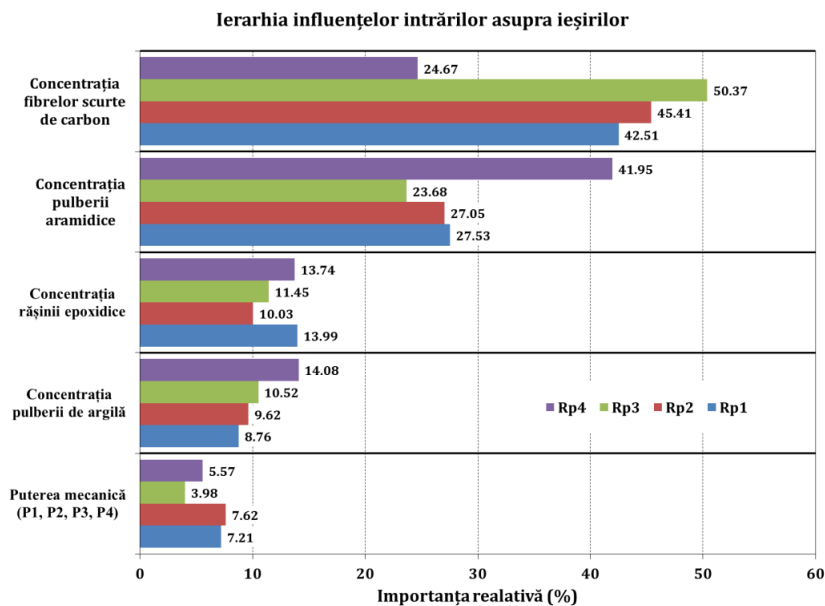


Figura 3-9 Ierarhia influențelor intrărilor asupra ieșirilor pentru rețeaua neuronală artificială

3.1.4.3. Optimizarea concentrației de aditiv pentru modelul neuronal artificial

Optimizarea concentrației de aditiv a constat în identificarea compozitului cu o anumită compoziție care să aibă cel mai mic coeficient de frecare și cea mai mică intensitate specifică uzurii liniare pe intervalul studiat (pentru fiecare putere mecanică în parte). Astfel, după rularea procesului de optimizare a modelului neuronal, în condiții de minim pentru proprietățile tribologice, a fost obținută rețeta:

- cu 85.4% rășina epoxidică, 7% pulbere aramidică și 7.6% pulbere de argilă pentru puterea mecanică de 5.62 Nm/s;
- cu 75.4% rășina epoxidică, 17% pulbere aramidică și 7.6% pulbere de argilă pentru puterea mecanică de 8.25 Nm/s;
- cu 74.8% rășina epoxidică, 20.2% pulbere aramidică și 5% pulbere de argilă pentru puterea mecanică de 11.25 Nm/s;
- cu 78.2% rășina epoxidică, 17.5% pulbere aramidică și 4.3% pulbere de argilă pentru puterea mecanică de 16.5 Nm/s;

Pentru validarea rezultatului au fost necesar formarea compozitului cu 78.4% rășina epoxidică, 15.4% pulbere aramidică și 6.2% pulbere de argilă ca media a rețetelor date de modelul neuronal și testarea acestora.

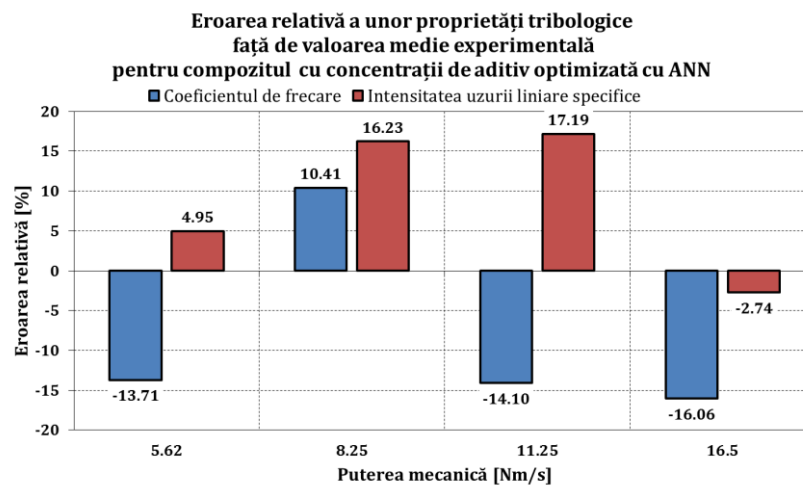


Figura 3-10 Erorile relative ale coeficientului de frecare și a intensității uzurii liniare specifice pentru concentrațiile de aditiv optimizate cu ajutorul rețelei neuronale artificiale față de valoarea medie experimentală

Erorile relative ale coeficientului de frecare și a intensității uzurii liniare specifice față de valoarea medie experimentală sunt reprezentate în Figura 3-10. Se observă că valoarea maximă a erorii relative se plasează în jurul valorii de 17% pentru intensitatea de uzură liniară la puterea mecanică de testare de 11.25 Nm/s. Eroarea minimă obținută a fost de asemenea pentru intensitatea uzurii liniare specifice, în cazul puterii mecanice de testare de 16.5 Nm/s.

3.2. Uzura compozitelor formate

Materialele formate au fost testate la uzură prin abraziune prin metoda *știft pe disc*, cu știftul de polimer, sau compozit polimeric, și disc abraziv. În procesul de testare au fost setați mai mulți parametri. Cei mai reprezentativi parametri au fost: forța normală de 7N și viteza de alunecare de 1m/s pe distanța de 180m. La acești parametri uzura prin abraziune a avut un caracter distructiv sever.

3.2.1. Analiza comportării la uzura prin abraziune a rășinii epoxidice neaditivate comparativ cu rășina epoxidică aditivată cu 10% vol. de argilă

Evoluția uzurii liniare pentru rășina epoxidică a înregistrat un avans mediu de aproximativ 5.78mm iar pentru rășina epoxidică aditivată cu pulbere de argilă (vol. 10%) uzura liniară medie de 5.26mm (Figura 3-11 a.). Pantele curbale de uzură liniară au același comportament până la 70m parcurși. Ulterior, pentru rășina epoxidică aditivată cu argilă a fost înregistrată o stabilitate mai bună, datorată în principal particulelor de argilă care, fiind dislocate din matricea epoxidică funcționează ca un „al treilea corp”. Se observă că pentru primii 10m parcurși a fost înregistrată o uzură mai severă în care discul abraziv se încarcă cu particule de uzură, aceasta se poate vedea în Figura 3-11 (b) unde se observă o mică porțiune din urma pinului pe disc. Această distanță este considerată a fi perioada de rodaj a triboelementelor.

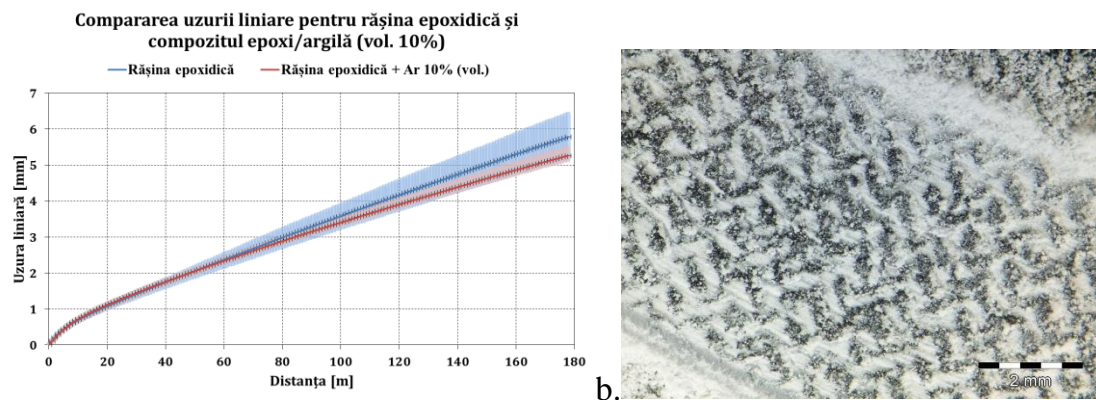


Figura 3-11 a. Comparația uzurii liniare pentru rășina epoxidică și compozitul epoxi/argilă (vol. 10%) obținute în urma testului de uzură severă; b. Porțiuni din traseul pinului din polimer pe discul abraziv

Cu ajutorul microscopului electronic au fost identificate anumite zone de pe suprafețele de contact între triboelemente (Figura 3-12). Astfel, pot fi observate zone cu textură gri mai închisă, care reprezintă, de fapt, suprafața locală de contact real temporar. De asemenea, comparând Figura 3-12 (a) cu (b) se distinge clar diferența brazdelor mai rugoase în cazul rășinii epoxidice. Datorită particulelor de argilă, procesul de uzură prin abraziune a compozitului respectiv are un caracter distructiv mai mic relativ la rășina epoxidică, deoarece particulele de argilă „încarcă” (se transfer) pe hârtia abrazivă, modificându-i topografia în sensul reducerii microasperităților și deci, reducând componenta de abraziune.

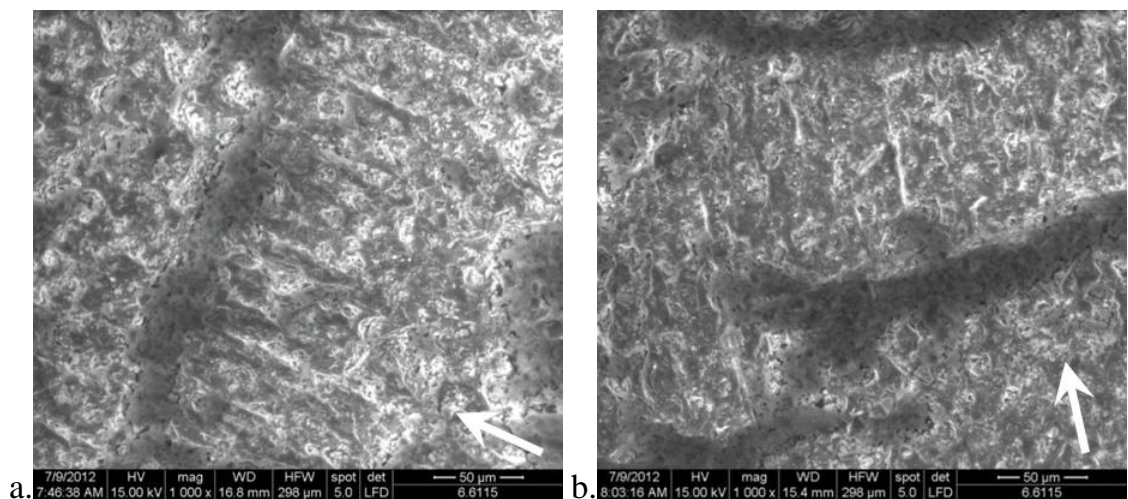


Figura 3-12 Imagini SEM pe suprafața de contact pentru: a. rășina epoxidică; b. compozitul epoxidic aditivat cu 10% pulbere de argilă.

3.2.2. Analiza comportării la uzura a rășinii epoxidice aditivate cu pulbere aramidică

În ceea ce privește comportarea la uzura severă a rășinii epoxidice aditivate cu pulbere aramidică, se observă că odată cu creșterea concentrației de aditiv uzura liniară scade. În Figura 3-13 este reprezentată evoluția uzurii liniare pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică, unde se evidențiază o abatere mai mare pentru epruvetele din rășină epoxidică neaditivată și pentru cea aditivată cu 5 și 25%. În cazul compozitului cu 15% pulbere aramidică variația este mică. Valoarea minimă a uzurii liniare de 3.45mm a fost pentru concentrația de 25% pulbere aramidică, urmată de 4.06mm și 4.76mm pentru concentrațiile de 15% și respectiv 5% pulbere aramidică.

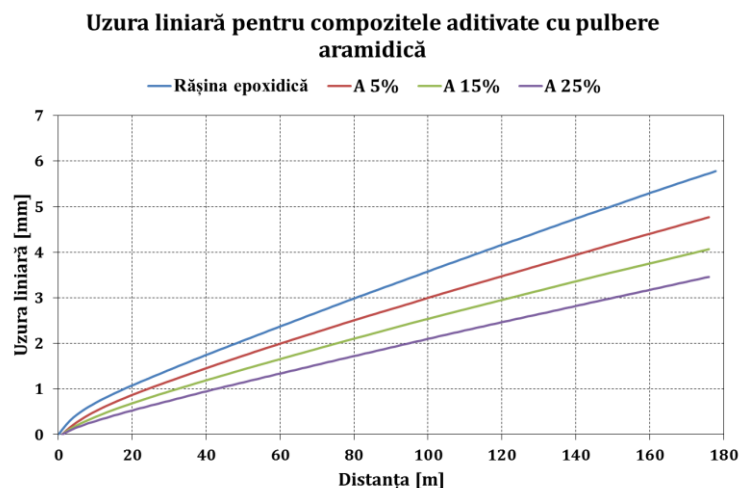


Figura 3-13 Uzura liniară pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică obținute în testului de uzură severă

Legătura de interfață foarte bună a matricei epoxidice cu pulberea aramidică nu permite detașarea și ruperea acesteia din matrice. Astfel, în procesul de uzură severă, prima fază care cedează este rășina epoxidică a cărei particule de uzură se comportă ca un „al treilea corp”, aceasta se observă în Figura 3-14 (a) și (b). Altfel se comportă pulberea aramidică, care datorită proprietăților vâscoelastice caracteristice termoplasticelelor, are o rezistență mai bună la uzură.

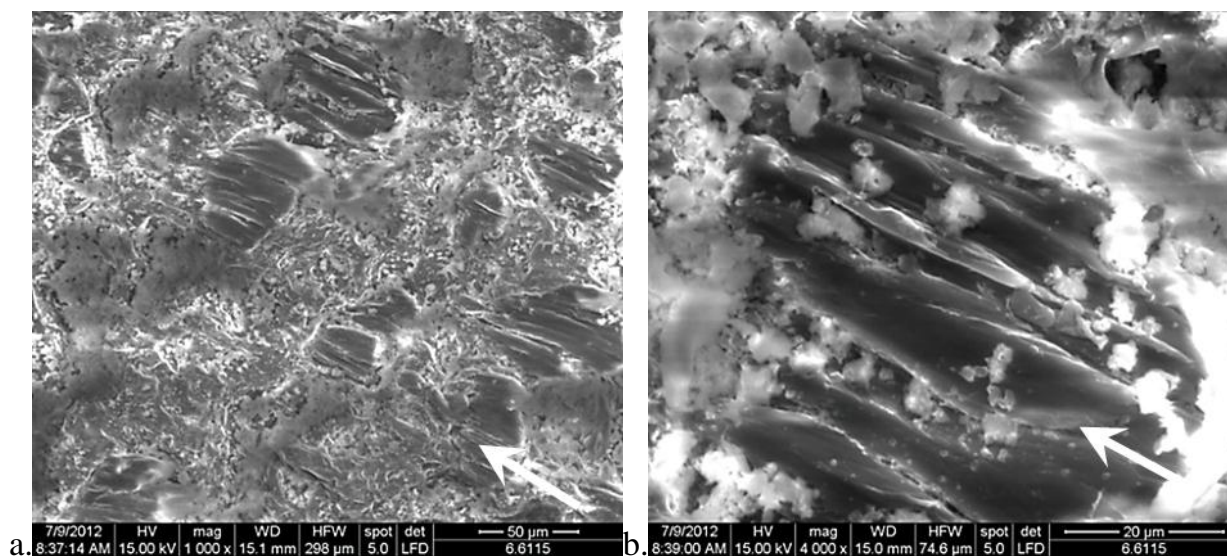


Figura 3-14 Imagini SEM ale suprafeței de contact pentru compozitul epoxidic aditivat cu 25% pulbere aramidică obținute în urma testului de uzură severă: a. Particule aramidice înglobate în matricea epoxidică (50μm); b. Urme ale uzurii severe a particulei aramidice (20μm)

3.2.3. Analiza comportării la uzura a rășinii epoxidice armate cu fibre scurte de carbon

Pentru compozitele cu 10% argilă armate cu diferite concentrații de fibre scurte de carbon se observă o variație mică a uzurii liniare în cazul compozitului cu 10% argilă și în cazul compozitului armat cu 15% fibre scurte de carbon. În ceea ce privește concentrațiile de 15% și 25% fibre, variația a fost aproximativ de 1mm față de valoarea medie pe concentrație. Valorile uzurii liniare medii obținute în urma testului de uzură prin abraziune severă scad odată cu scăderea concentrației de fibre scurte de carbon (Figura 3-15). Din punct de vedere al texturii suprafețelor epruvetelor de după testare, se observă goluri care au fost induse în material în procesul de formare, ca intruziuni

gazoase în imediata apropiere de fibrele scurte de carbon ceea ce le slăbește adeziunea cu matricea. Sunt evidențiate urme ale fibrelor dislocate din matrice. În procesul de uzură aceste goluri sunt umplute cu particule de uzură. Mecanismul de rupere al fibrelor scurte de carbon din matrice depinde foarte mult de interfața matrice agent de armare.

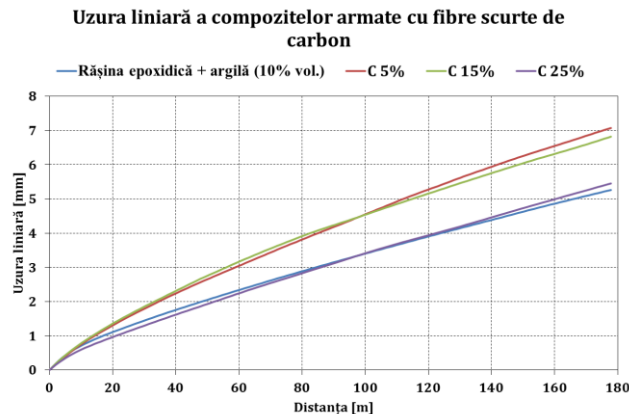


Figura 3-15 Uzura liniară pentru compozitele aditivat cu pulbere aramidică obținute în urma testului de uzură severă

Armarea cu concentrații mici de fibre scurte de carbon duce la scăderea uzurii înregistrând valori pentru uzura liniară de aproximativ 7.1mm pentru 5% și 6.8mm pentru 15% fibre. Pentru o aditivare de 25% fibre scurte de carbon, valoarea uzurii liniare a fost aproape de valoarea înregistrată pentru compozitul cu 10% pulbere de argilă – 5.4mm și respectiv 5.3mm (Figura 3-15).

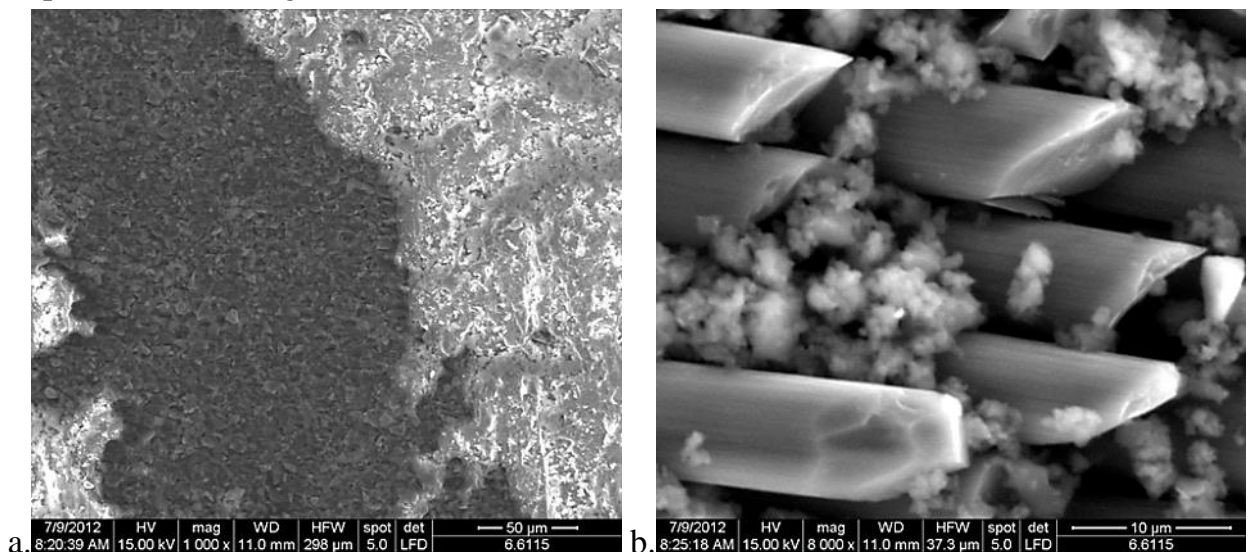


Figura 3-16 Imagini SEM pe suprafața de contact pentru compozitul epoxidic armat cu 25% fibre scurte de carbon obținute în urma testului de uzură prin abraziune: a. urma fibrei de carbon rupte din matrice; b. fibrele uzate cu particulele epoxidice reziduale

În Figura 3-16 (a), se observă urma unor aglomerări de fibre scurte de carbon, rezultată din dislocarea la interfață a fibrelor din matrice în procesul de uzură. Această urmă relevă legătura slabă dintre matrice și fibrele scurte de carbon, orientarea fibrelor în acest caz a fost paralelă cu planul de frecare. Deteriorarea fibrei depinde de poziția fibrei în raport cu direcția de alunecare. Cele orientate, aproximativ, pe direcția de alunecare sunt mai ușor desprinse comparativ cu cele orientate perpendicular. În Figura 3-16 (b) se observă aglomerări de fibre uzate cu particulele epoxidice reziduale care, în procesul de uzură ocupă locurile goale din material. Fragmentarea la vârfuri indică preluarea sarcinii mai mult pe fibre. Din cauza că matricea e rigidă, fibrele se fragmentează mai ușor.

3.2.4. Analiza intensității specifice a uzurii liniare medii pentru compozitele epoxidice formate

Intensitățile uzurii liniare specifice medii pentru materialele formate au fost centralizate în Figura 3-17. Pentru a identifica influența concentrațiilor de aditiv au fost luate în discuție: intensitatea uzurii liniare și coeficientul de frecare obținute în urma testului de uzură severă (Figura 3-18). Pentru compozitele aditivatate cu pulbere aramidică se evidențiază o scădere a intensității uzurii liniare specifice și a coeficientului de frecare odată cu creșterea concentrației de aditiv, rezultând astfel, o reducere a intensității cu 40% și cu 12% pentru coeficientul de frecare față de rășina epoxidică neaditivată.

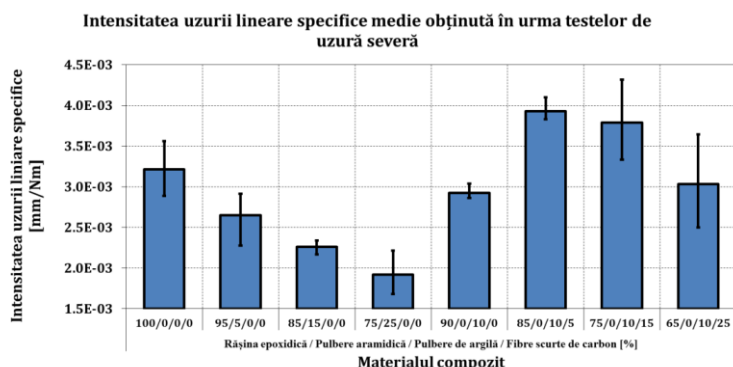


Figura 3-17 Intensitatea uzurii liniare specifice medii pentru compozitele formate obținută în urma testului de uzură severă

Pentru compozitele armate cu fibre scurte de carbon comparativ cu rășina epoxidică aditivată cu 10% argilă, intensitatea de uzură liniară a crescut pentru concentrațiile de 5% și 15%, deși coeficientul de frecare a fost aproximativ la fel, obținându-se valori de 0.72 și respectiv 0.73 (Figura 3-18). În cazul compozitului armat cu 25% fibre scurte de carbon valoarea medie a intensității a fost doar cu 4% mai mare față de compozitul aditivat cu 10% argilă, însă cu o abatere evident mai mare, iar pentru coeficientul de frecare se observă o scădere a acestuia cu aproximativ 3% (Figura 3-18). Clasa de compozite aditivatate cu pulbere aramidică au o comportare tribologică mai bună.

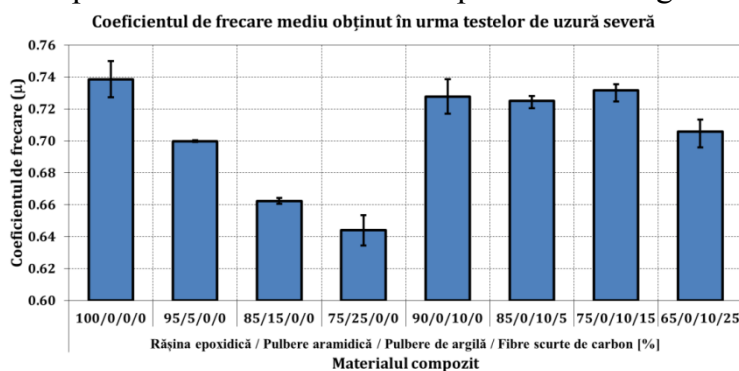


Figura 3-18 Coeficientul de frecare mediu pentru compozitele formate, obținut în urma testului de uzură severă

3.2.5. Analiza rezistenței la uzură pentru compozitele epoxidice formate

Valorile rezistenței la uzură obținute în urma testului de uzură prin abraziune confirmă îmbunătățirea proprietăților de uzură odată cu creșterea concentrației de pulbere aramidică, crescând astfel rezistența la uzură. În cazul compozitelor cu fibre scurte de carbon, rezistența la uzură scade pentru concentrațiile de 5% și 15% față de rășina epoxidică neaditivată și față de cea aditivată cu 10% argilă. Pentru concentrația de 25% fibre scurte de carbon, rezistența la uzură are aproximativ aceeași valoare ca în cazul

compozitului cu 10% argilă. Se poate concluziona, în cazul compozitelor formate, adăugarea fibrelor scurte de carbon în matricea epoxidică nu îmbunătățește comportamentul la uzură.

3.2.6. Utilizarea rețelelor neuronale artificiale pentru predicția și optimizarea proprietăților tribologice

Rezultatele obținute, în urma testelor de uzură severă au fost utilizate, ca și în cazul testelor *bloc pe inel*, în elaborarea unui model neuronal cu scopul predicției proprietăților pentru anumite concentrații. De asemenea modelul ne permite obținerea concentrațiilor de aditiv pentru optimizarea proprietăților testate.

Ca unități de intrare au fost selectate concentrațiile fazelor din compozit, obținându-se astfel 4 intrări, iar ca unități de ieșire ale rețelei au fost selectate valorile medii experimentale ale coeficientului de frecare, ale intensității de uzură liniară și ale rezistenței la uzură obținute în urma testului de uzură severă.

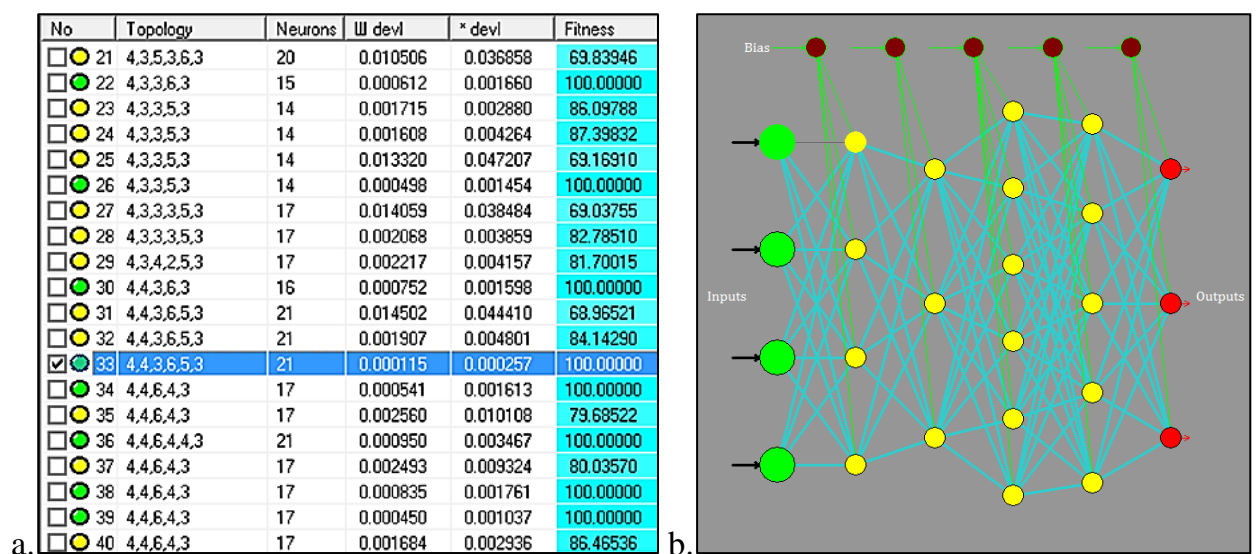


Figura 3-19 Rețeaua neuronală artificială: a. Structura optimizată prin algoritmi genetici; b. Arhitectura rețelei

Rezultatul obținut în urma aplicării algoritmului genetic este reprezentat în Figura 3-19. Se observă în Figura 3-19 (a) că, deși sunt mai multe variante care îndeplinesc condițiile inițiale, doar varianta cu numărul 33 oferă valorile minime pentru abaterile pătratică medii și maxime. Ca urmare, această topologie va fi aleasă pentru rețeaua modelului neuronal. Astfel, optimul structurii alese are 4 niveluri ascunse cu 4, 3, 6 și respectiv 5 unități neuronale, reprezentată în Figura 3-19 (b).

3.2.6.1. Predicția valorilor de ieșire pentru modelul neuronal artificial

În procesul de antrenare a rețelei neuronale nu a fost introdus compozitul aditivat cu 15% pulbere aramidică și compozitul aditivat cu 10% argilă armat cu 15% fibre scurte de carbon, cu scopul de a valida modelul neuronal. În urma antrenării modelului neuronal a fost interogată rețeaua pentru concentrațiile de aditiv menționate. Erorile relative ale coeficientului de frecare, ale intensității uzurii liniare și ale rezistenței la uzură față de valoarea medie experimentală sunt reprezentate în Figura 3-20. Se observă că valoarea maximă a erorii relative nu depășește 7%, obținută în cazul rezistenței la uzură pentru compozitul cu 15 % pulbere aramidică.

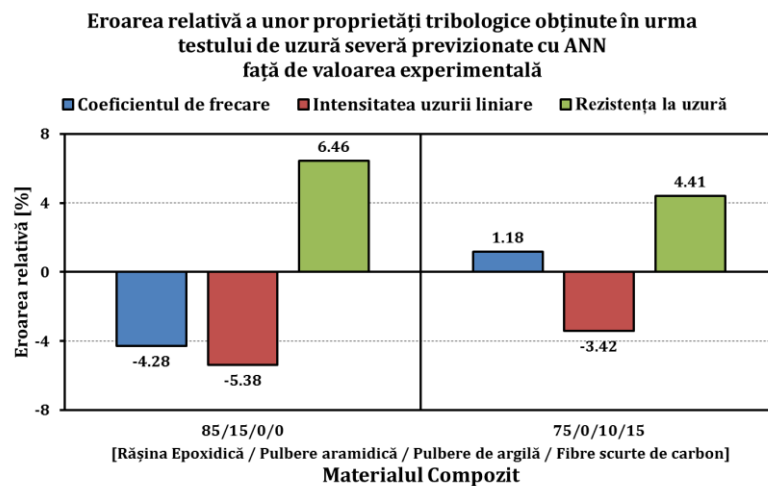


Figura 3-20 Erorile relative ale coeficientului de frecare, ale intensității uzurii liniare și ale rezistenței la uzură obținute în urma testului de uzură severă previzionate cu ajutorul rețelei neuronale artificiale față de valorile medii experimentale

3.2.6.2. Analiza interdependenței intrări-ieșiri pentru modelul neuronal artificial

Comparând Figura 3-21 cu Figura 3-9, se observă aceeași ierarhie a fazelor din compozit, deși rețelele neuronale au arhitecturi diferite (Figura 3-7 b și Figura 3-19 b). Aceasta dovedește că interdependențele reprezentate de simulatorul neuronal nu se limitează la valorile numerice, ci sunt situate la nivel fenomenologic.

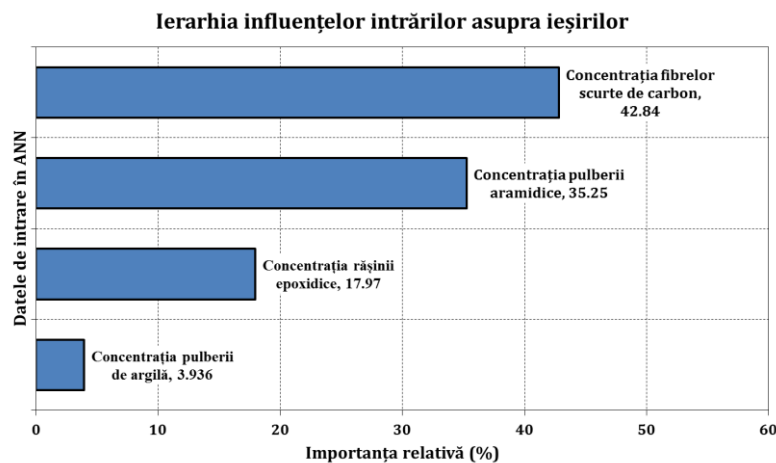


Figura 3-21 Ierarhia influențelor intrărilor asupra ieșirilor pentru rețeaua neuronală artificială

3.2.6.3. Optimizarea concentrației de aditiv pentru modelul neuronal artificial

Optimizarea concentrației de aditiv a constat în identificarea compozitului cu o anumită compoziție, care să aibă cel mai mic coeficient de frecare, cea mai mică intensitate de uzură liniară și cea mai mare rezistență la uzură. Astfel, după rularea procesului de optimizare, a simulatorului neuronal, pentru condițiile de minim a coeficientului de frecare și a intensității uzurii liniare și condiția de maxim ale rezistenței la uzură, a fost obținută rețeta cu 70% rășina epoxidică, 25% pulbere aramică și 5% pulbere de argilă.

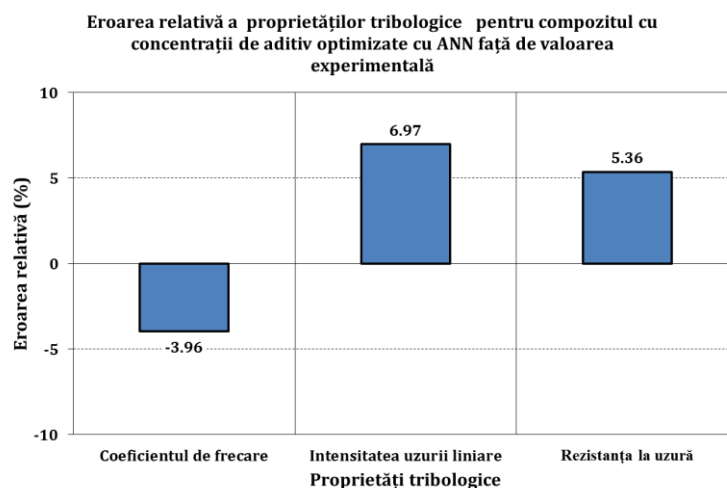


Figura 3-22 Erorile relative ale coeficientului de frecare, ale intensității de uzură liniară și rezistenței la uzură pentru concentrațiile de aditiv optimizate cu ajutorul rețelei neuronale față de valoarea medie experimentală

Pentru validarea rezultatului a fost necesar formarea și testarea materialelor cu rețeta dată de ANN. Erorile relative ale coeficientului de frecare, ale intensității uzurii liniare și ale rezistenței la uzură față de valoarea medie experimentală sunt reprezentate în Figura 3-22. Se observă că valoarea maximă a erorii relative se plasează în jurul valorii de 7% pentru intensitatea uzurii liniare și valoarea minimă a erorii relative este în cazul coeficientului de frecare – 3.96%, pentru rezistența la uzură eroarea obținută a fost de 5.36%.

3.3.Concluzii

Din perspectiva comportamentului tribologic *bloc pe inel*, rășina epoxidică neaditivată comparativ cu cea aditivată cu 10% pulbere de argilă se rezumă următoarele:

- coeficientul de frecare mai mare pentru rășina epoxidică la forță și viteza de alunecare mică, datorită apariției particulelor de argilă dislocate din matrice care, sunt atenuate în mișcarea de rostogolire, reduce coeficientul de frecare;
- coeficient de frecare mai mare pentru rășina epoxidică aditivată cu 10% argilă pentru forță și viteză mare.

Din analiza tribologică *bloc pe inel* a compozitelor aditivate cu pulbere aramidică se desprind următoarele concluzii:

- în analiza influenței forței de încărcare asupra coeficientului de frecare se observă pentru viteza de alunecare de 0.75m/s că, odată cu creșterea forței de încărcare, coeficientul de frecare scade, fenomen explicat prin apariția particulelor de uzură care joacă un rol de lubrifianți solizi. Pentru viteza de 1.1m/s, se remarcă creșterea coeficientului de frecare odată cu creșterea forței de încărcare;
- în analiza influenței vitezei de alunecare asupra coeficientului de frecare se observă o scădere a acestuia odată cu creșterea vitezei pentru F=7.5N. La forța de încărcare de 15N, coeficientul de frecare crește odată cu creșterea vitezei.

Din analiza *bloc pe inel* a rezultatelor compozitelor armate cu fibre scurte de carbon rezumă următoarele concluzii:

- în analiza influenței vitezei de alunecare asupra coeficientului de frecare se observă că la F=7.5N odată cu creșterea vitezei de alunecare, crește și coeficientul de frecare pentru toate compozitele armate cu fibre scurte de carbon, iar pentru F=15N, coeficientul de frecare scade odată cu creșterea vitezei. În procesul de frecare particulele de argilă sunt detașate din matrice și adunate la muchiile fibrelor; în

contact cu oțelul aceste aglomerări reziduale funcționează ca *frâne locale*, astfel, crește coeficientul de frecare. Ținând cont și de intensitatea uzurii liniare înregistrate, se poate deduce că abia la forță de încărcare mare și viteză de alunecare mare, fibrele scurte de carbon sunt dislocate din matricea epoxidică sau fragmentate, astfel, se reduce coeficientul de frecare;

- în analiza influenței forței de încărcare asupra coeficientului de frecare se observă că atât pentru $v=0.75\text{m/s}$, cât și pentru $v=1.1\text{m/s}$, coeficientului de frecare creștere odată cu creșterea forței.

În determinarea proprietăților tribologice obținute în urma testelor de uzură severă prin metoda *știft pe disc* au rezumat o serie de concluzii:

- pentru compozitele aditivat cu pulbere aramidică se observă că odată cu creșterea concentrației de aditiv intensitatea uzurii liniare și coeficientul de frecare scad, și respectiv crește rezistența la uzură;
- pentru compozitele armate cu fibre scurte de carbon, se observă o creștere a intensității uzurii liniare odată cu creșterea gradului de armare, de asemenea, crește și coeficientul de frecare și respectiv scade rezistența la uzură.

Predicția cu ajutorul modelelor neuronale artificiale a proprietăților tribologice măsurate a fost făcută pentru compozitele alese cu scopul de a valida simulatorul, obținându-se astfel erori relative față de valorile medii experimentale de maxim 11%.

În analiza interdependenței intrării-ieșiri, se remarcă influența relativă mare a raportului volumic de fibre scurte de carbon, urmată de pulberea aramidică și rășina epoxidică. Aceasta arată că interdependențele reprezentate de simulatorul neuronal nu se limitează la valorile numerice, ci sunt situate la nivel fenomenologic.

Optimizarea concentrației de aditiv cu ajutorul modelelor neuronale artificiale a fost făcută pentru optimizarea proprietăților tribologice indicate (minime sau maxime, după caz).

Au fost obținute două compozite cu concentrații optime (conform criteriilor cerute):

- 1) 78.4% rășină epoxidică, 15.4% pulbere aramidică și 6.2% pulbere de argilă;
- 2) 70% rășină epoxidică, 25% pulbere aramidică și 5% pulbere de argilă.

În procesul de validare a rezultatelor optimizării au fost realizate prin tehnologia de laborator materialele cu concentrațiile date și ulterior testate. Erorile relative față de valorile medii experimentale obținute au fost de maxim 17%, considerându-se a fi o eroare mare.

Ținând cont de faptul că un fenomen tribologic reflectă sinergia unor procese complexe a fost necesar îmbunătățirea modelului neuronal, prin adăugarea unor proprietăți mecanice și termice.

4. Analiza proprietăților mecanice și termice ale compozitelor epoxidice

4.1. Analiza proprietăților mecanice ale compozitelor epoxidice formate

Tehnicile de optimizare și predicție a proprietăților tribologice cuprind, de obicei, mai multe caracteristici de material. Pentru formarea modelului matematic, pe lângă răspunsul tribologic al compozitelor, este necesară caracterizarea proprietăților mecanice, termice etc. Astfel, modelul matematic, care cuprinde mai multe caracteristici de material, va reprezenta „cartea de identitate” a clasei de compozite studiate.

4.1.1. Analiza proprietăților mecanice la încovoiere

Standardele pe baza cărora au fost făcute încercările, și aparatul de testare, sunt menționate în subcapitolul 2.5.2 al tezei. Prin metoda utilizată a fost posibilă analiza următoarelor proprietăți: tensiunea la rupere, modulul de elasticitate și energia la rupere.

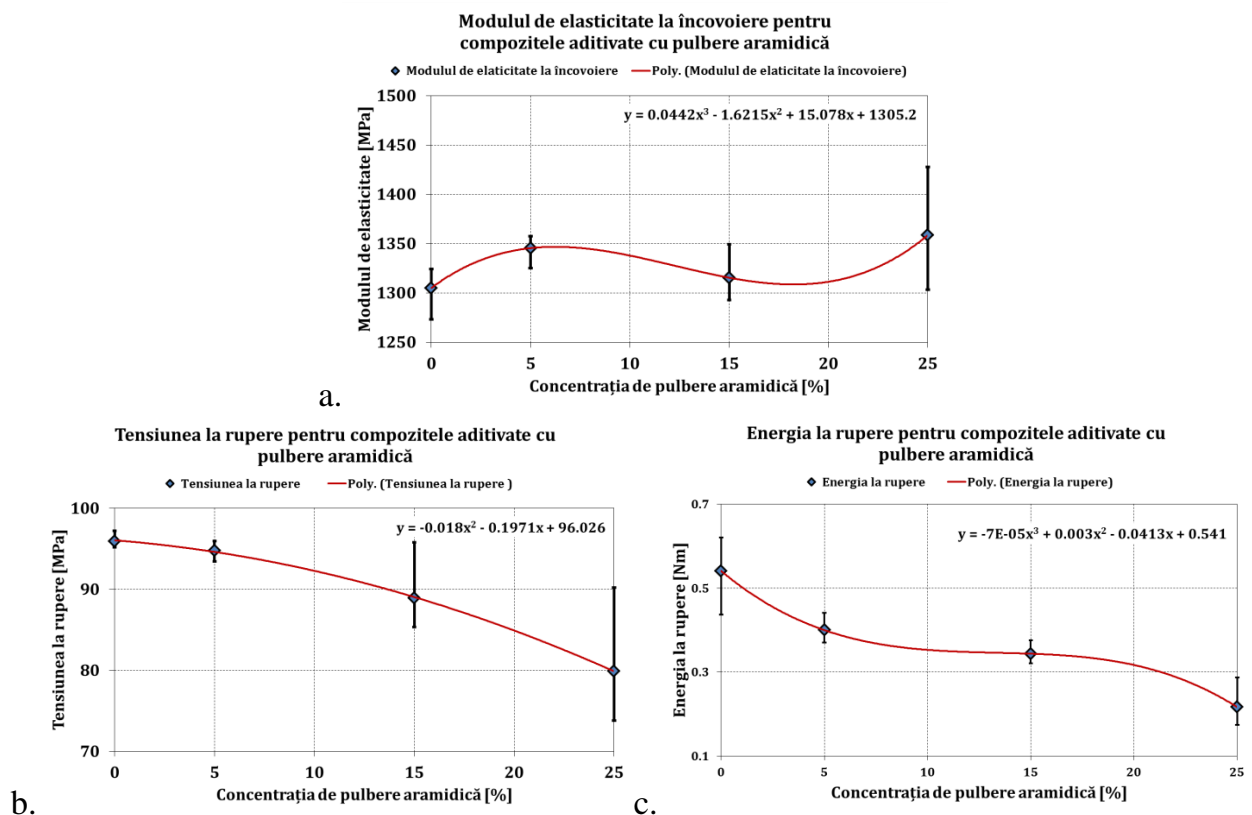


Figura 4-1 Proprietățile mecanice la încovoiere ale compozitelor aditivate cu pulbere aramică: a. Modulul de elasticitate; b. Tensiunea la rupere; c. Energia la rupere

În cazul modulului de elasticitate la încovoiere, pentru compozitele aditivate cu pulbere aramică, se observă că valorile obținute sunt cuprinse în intervalul de 1250-1450MPa (Figura 4-1 a). Se remarcă că, pentru un eșantion de 5 epruvete, abaterea față de medie este mai mare pentru concentrații mai mari de pulbere aramică. De asemenea, este necesar să se menționeze că modulul de elasticitate crește odată ce rășina epoxidică este aditivată.

În analiza tensiunii la rupere (Figura 4-1 b) se observă o abatere mai mare față de medie pentru compozitele cu concentrații mai mari de pulbere aramică. Valorile medii ale tensiunilor la rupere scad odată cu creșterea concentrației de pulbere aditivată în rășina epoxidică. Astfel, valoarea medie a tensiunii este cu 1% mai mică pentru compozitul cu 5% pulbere, cu 7% pentru concentrația de 15% pulbere și cu 16% pentru concentrația de 25% pulbere.

Aditivarea rășinii epoxidice cu pulbere aramică duce la scăderea valorii energiei la rupere cu 30% pentru 5% pulbere, cu aproximativ 45% pentru 15% pulbere și cu 60% pentru 25% pulbere (Figura 4-1 c).

Comportamentul mecanic la încovoiere a compozitelor aditivate cu pulbere aramică poate fi explicat prin prisma proprietăților puternic elastice ale agentului de armare față de cele ale matricei.

Valorile medii ale proprietăților rezultate din testele de încovoiere pentru compozitele cu 10% argilă armate cu diferite concentrații de fibre scurte de carbon sunt reprezentate în Figura 4-2. Modulul de elasticitate la încovoiere, pentru clasa de

compozite menționată, crește odată cu creșterea concentrației de fibre (Figura 4-2 a). La concentrația de 5% fibre, influența agentului de armare asupra modului de elasticitate, este nesemnificativă. Această influență este se conturează pentru concentrațiile de 15% și 25% fibre. Astfel, au fost obținute valori mai mari cu 4% pentru concentrația de 15% fibre și cu 18% pentru concentrația de 25% fibre față de compozitul cu 10% argilă.

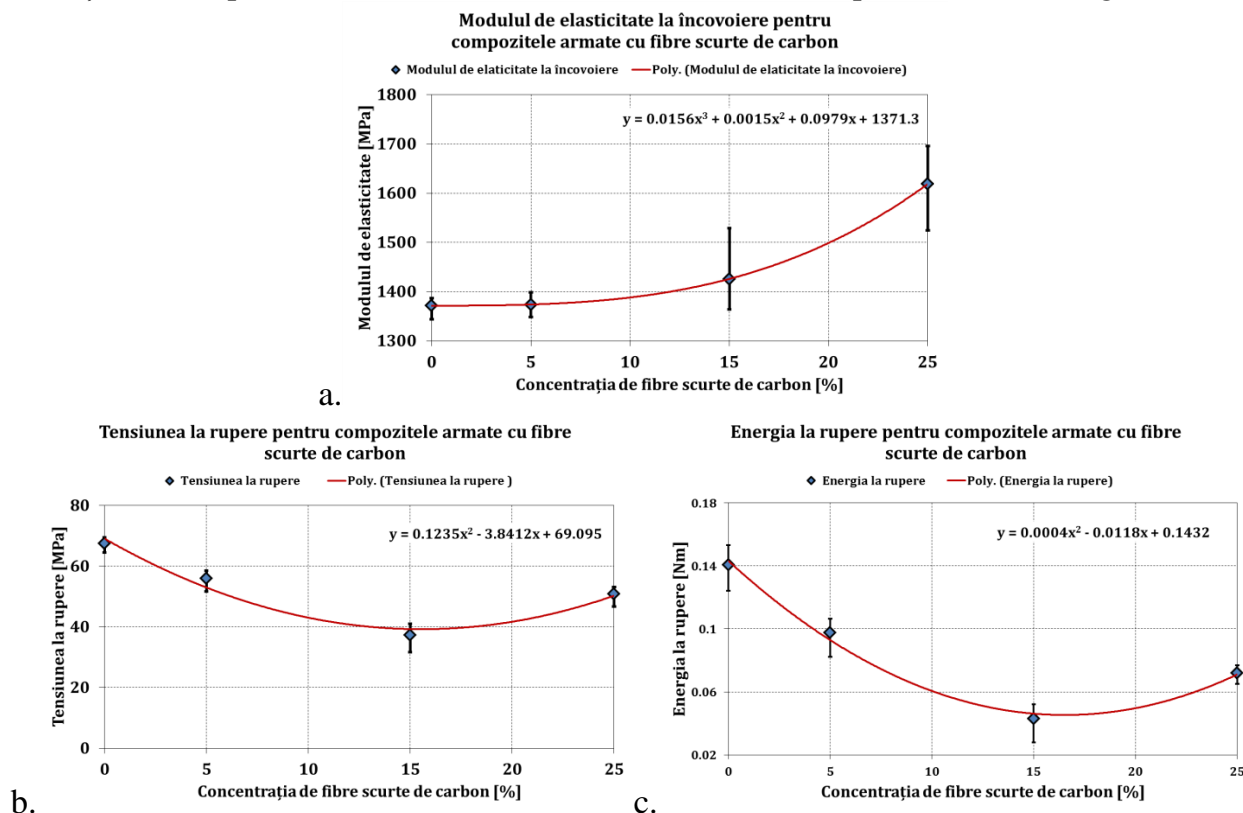


Figura 4-2 Proprietățile mecanice la încovoiere ale compozitelor cu 10% argilă armate cu fibre scurte de carbon: a. Modulul de elasticitate; b. Tensiunea la rupere; c. Energia la rupere

În ceea ce privește valorile medii ale tensiunii la rupere (Figura 4-2 b), pentru compozitele armate cu fibre scurte de carbon, se evidențiază o scădere a acestora odată cu creșterea concentrației de fibre. Minimul în acest caz este pentru compozitul cu 15% fibre, cu 44% mai mic decât compozitul epoxidic aditivat cu 10% pulbere de argilă. În cazul energiei la rupere, valorile medii obținute scad odată ce sunt armate fibrele scurte. Minimul energiei la rupere a fost în cazul compozitului cu 15% fibre – cu aproximativ 48% (Figura 4-2 c) față de compozitul cu 10% argilă. Comportamentul mecanic al acestei clase de compozite este ușor de remarcat prin prisma fazelor constitutive ale materialului. Evident este faptul că odată cu armarea cu fibre scurte de carbon, modulul de elasticitate la încovoiere crește, tensiunea și energia la rupere scad. Aceasta se datorează în principal proprietăților mecanice, dar și legăturilor de interfață matrice – agent de armare ale fibrelor scurte de carbon.

4.1.1. Analiza proprietăților mecanice la compresiune

Metodologia de testare a materialelor compozite formate este detaliată în subcapitolul 2.5.2 al tezei . Epruvetele testate (Figura 2 – 35, numărul 5) sunt de formă cilindrică cu diametrul egal cu înălțimea de 6.2mm. Pentru fiecare tip de compozit au fost testate câte cinci epruvete. Prin metoda utilizată a fost posibilă analiza modului de elasticitate și a tensiunii la curgere.

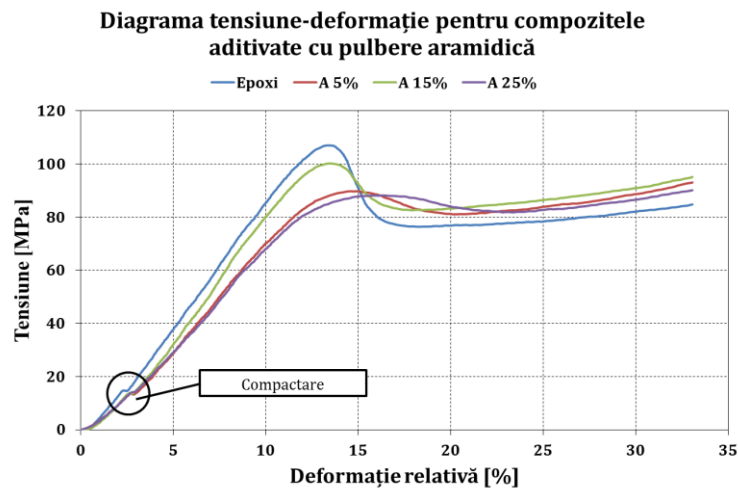


Figura 4-3 Diagrama tensiune – deformație pentru compozitele aditivate cu pulbere aramică

Pe diagrama tensiune – deformație (Figura 4-3) pentru compozitele aditivate cu pulbere aramică se pot identifica zonele de calcul ale proprietăților mecanice. De asemenea, ies în evidență vârfurile apărute la 3-4% a deformației relative. Aceste vârfuri apar la o forță de 350-400N, considerându-se că este forța la care asperitățile materialului cedează la contact cu bacurile de compresiune, astfel, atingându-se o suprafață reală de contact care este mai mare decât cea inițială. Aceasta poate fi considerată ca fiind un proces de compactare sau de „așezare”.

În ceea ce privește valorile medii ale modulelor de elasticitate (Figura 4-4 a) rezultatele din testele mecanice de compresiune, se observă că odată cu aditivarea rășinii epoxidice cu pulbere aramică, modulul de elasticitate, cât și tensiunea la curgere, (Figura 4-4 b) scad pentru concentrațiile de 5% și 25% pulbere, și este aproximativ egal pentru 15% pulbere față de rășina epoxidică neaditivată.

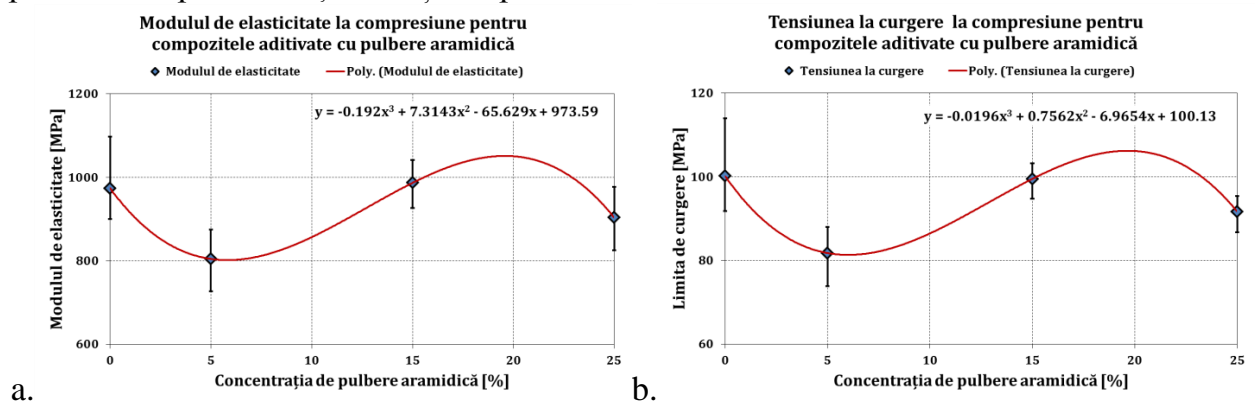


Figura 4-4 Proprietățile mecanice la compresiune pentru compozitele aditivate cu pulbere aramică: a. Modulul de elasticitate; b. Limita de curgere

La apariția microfisurilor în compozit (odată ce acesta este supus testului de compresiune) în momentul atingerii limitei de curgere se inițiază forfecarea stratificată. Aceasta apare la 12-15% deformație relativă.

Ca și în cazul compozitelor aditivate cu pulbere aramică, pe diagrama tensiune – deformație (Figura 4-5) pentru compozitele armate cu fibre scurte de carbon poate fi identificată zona de „așezare” a materialului. De asemenea, este de remarcat comportamentul similar al curbelor tensiune – deformație pentru diferite concentrații de fibre, cu o tensiune la curgere mai mare pentru compozitul cu 10% pulbere de argilă (referința).

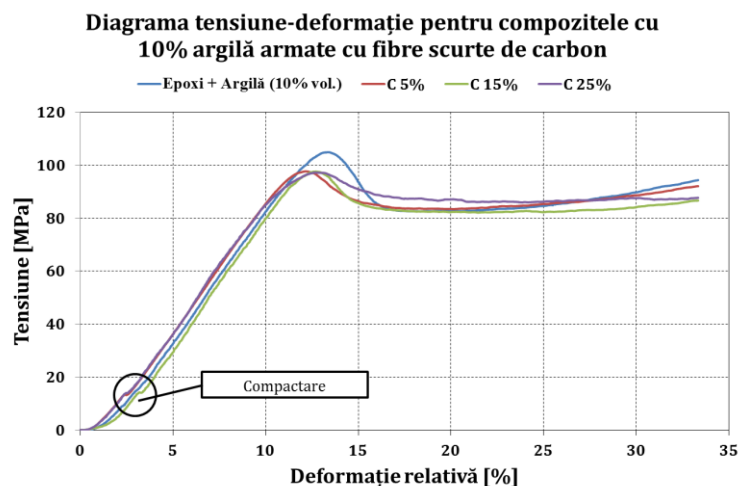


Figura 4-5 Diagrama tensiune – deformație pentru compozitele armate cu fibre scurte de carbon

Valorile medii ale modulelor de elasticitate pentru setul de compozite armate cu fibre scurte de carbon sunt cuprinse între 900-1100MPa (Figura 4-6 a). Concentrațiile diferite de fibre scurte de carbon în matricea epoxidică nu modifică semnificativ comportamentul la compresiune. Modul de așezare a fibrei în matrice, cât și interfața fibră – matrice sunt unii dintre principalii factori ce influențează proprietățile mecanice la compresiune.

În ceea ce privește tensiunea la curgere, după cum se vede în Figura 4-5 dar și în Figura 4-6, valorile medii cu abaterile respective scad odată cu armarea fibrelor.

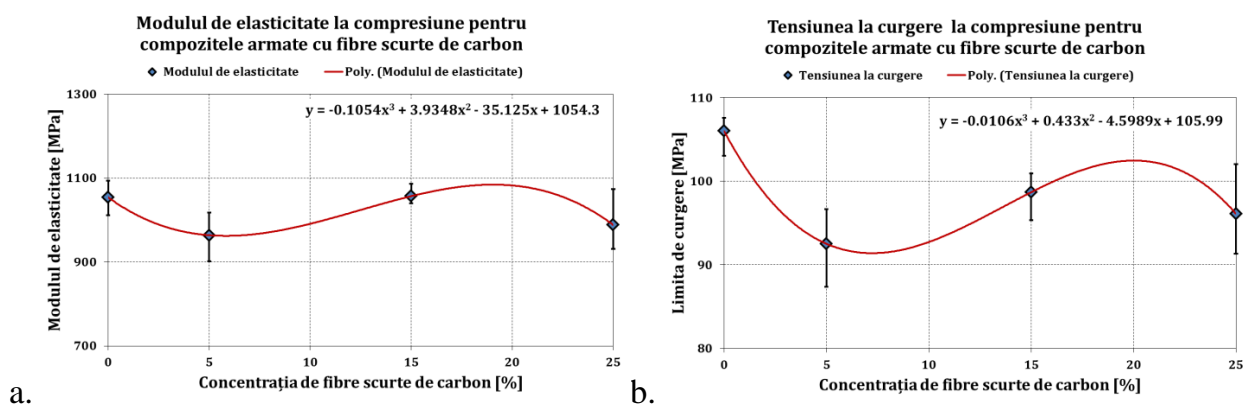


Figura 4-6 Proprietățile mecanice la compresiune pentru compozitele armate cu fibre scurte de carbon:
 a. Modulul de elasticitate; b. Limita de curgere

4.2. Analiza proprietăților termice ale compozitelor epoxidice formate

4.2.1. Analiza dilatării termice

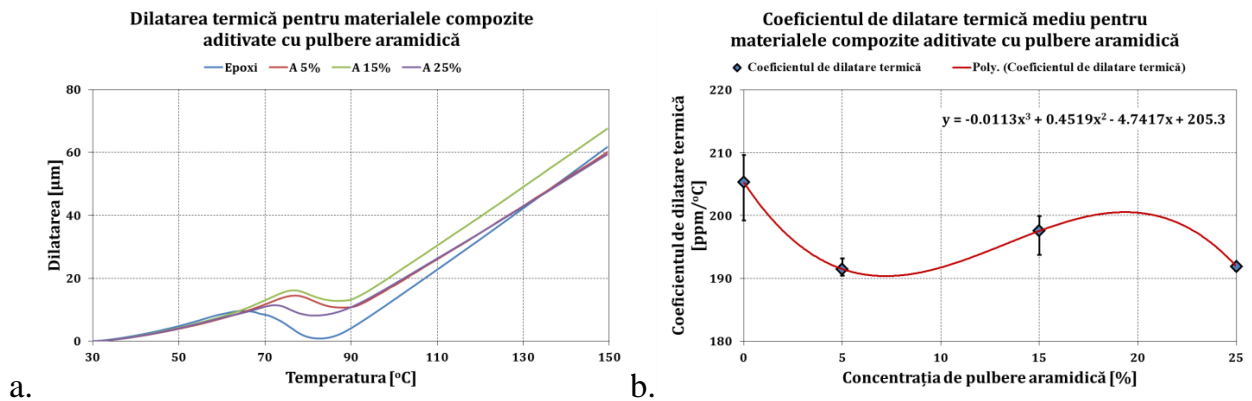


Figura 4-7 Proprietăți termice pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică: a. Dilatarea termică; b. Coeficientul linear de dilatare termică

Coeficienții de dilatare termică liniară medii, pentru setul de compozite aditivate cu pulbere aramidică, sunt reprezentați în Figura 4-7 (b).

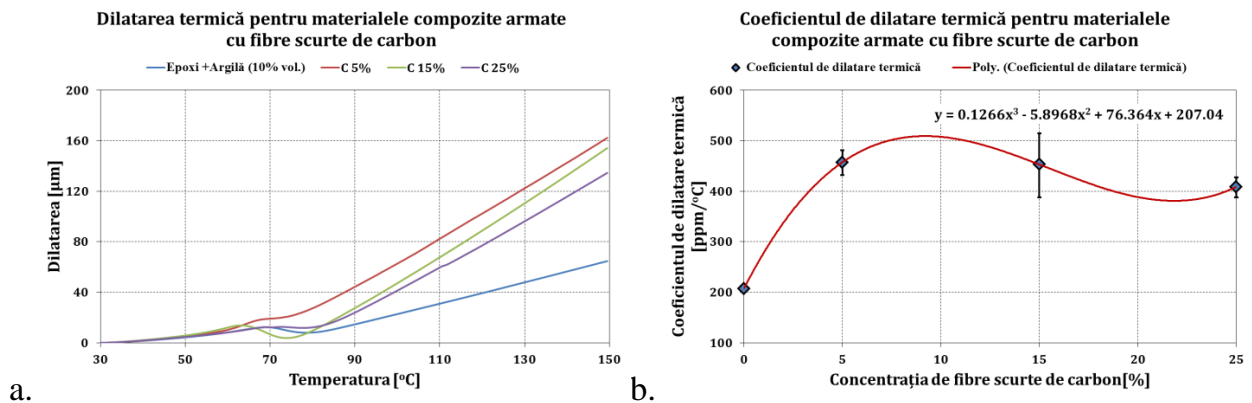


Figura 4-8 Proprietăți termice pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică: a. Dilatarea termică; b. Coeficientul linear de dilatare termică

În cazul compozitelor armate cu fibre scurte de carbon, se evidențiază creșterea dilatării absolute liniare față de rășina epoxidică aditivată cu pulbere de argilă (Figura 4-8 a), fenomen confirmat și de valorile coeficientului linear de dilatare (Figura 4-8 b) care este aproximativ dublat. Ținând cont de proprietățile termice ale fibrelor de carbon, se remarcă influența gradului de armare asupra dilatării.

4.2.2. Analiza rezultatelor experimentale pentru căldura specifică

Compozitele formate au fost încălzite de la 30° la 150°C cu o rată de încălzire de 10°C/min și răcite cu aceeași rată. Intervalul de interes pentru determinarea căldurii specifice a fost 110°-70°C a termogramei. Pentru fiecare concentrație au fost testate trei epruvete. În Figura 2–35, numărul 9 prezintă forma epruvetelor utilizate pentru determinarea căldurii specifice, cu următoarele dimensiuni: diametru de 3.2mm și înălțimea de 4.8mm.

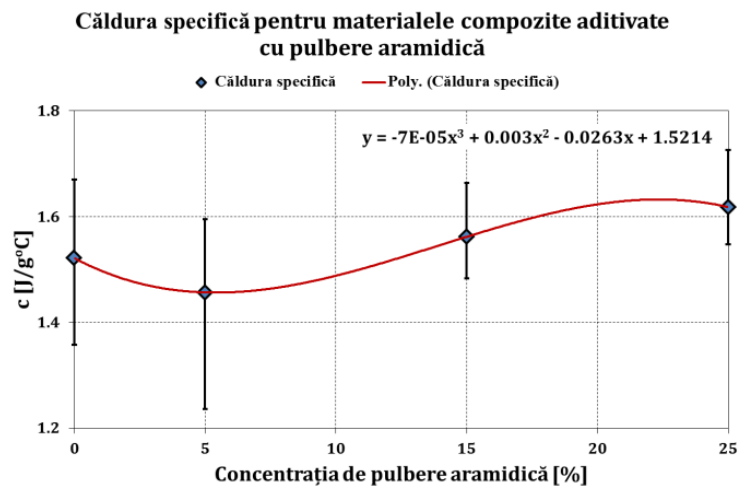


Figura 4-9 Căldura specifică pentru materialele compozite aditivate cu pulbere aramidică

Pentru clasa de compozite aditivate cu pulbere aramidică (Figura 4-9), valorile căldurii specifice medii au avut o variație maximă de 6% față de rășina epoxidică în cazul concentrației de 25% pulbere. Se observă trendul ușor crescător odată cu creșterea concentrației de pulbere.

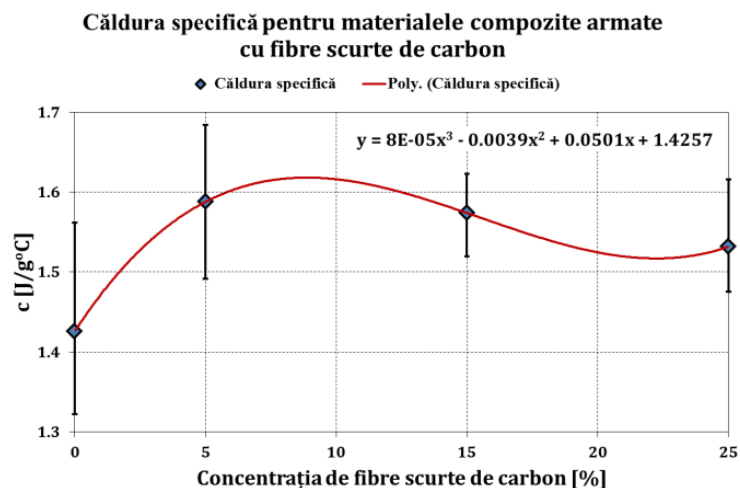


Figura 4-10 Căldura specifică pentru materialele compozite cu 10% argilă armate cu diferite concentrații de fibre scurte de carbon

În cazul compozitelor cu 10% argilă armate cu diferite concentrații de fibre scurte de carbon (Figura 4-10), valorile medii ale căldurii specifice au avut o variație de maxim 11% pentru compozitul armat cu 5% fibre, față de rășina epoxidică aditivată cu 10% argilă. Se observă un trend ușor descrescător odată cu creșterea concentrației de fibre scurte de carbon.

4.2.3. Analiza conductivității termice

Conform metodei descrise în subcapitolul 2.5.3 al tezei, epruvetele cilindrice, de trei dimensiuni diferite, au fost supuse unui tratament termic de încălzire de la 30° la 190°C cu 15°C/min. Epruvetele au fost plasate pe senzorul termic, în celula DSC-ului, pe fața de sus a probei a fost așezat creuzetul cu indiu.

Atât în cazul compozitelor aditivate cu pulbere aramidică, cât și în cazul celor armate cu fibre scurte de carbon, valorile medii ale conductivității termice sunt mai mari decât cele pentru matricea epoxidică (Figura 4-11).

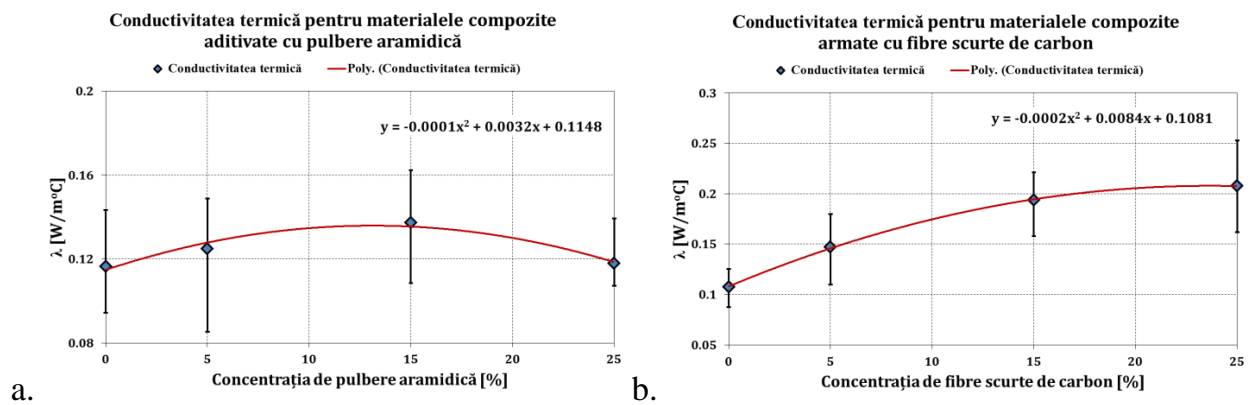


Figura 4-11 Conductivitatea termică pentru materialele compozite: a. aditivat cu pulbere aramidică; b. armate cu fibre scurte de carbon

Pentru compozitele aditivat cu pulbere aramidică se observă variații mici față de rășina epoxidică (Figura 4-11 a). În cazul compozitelor cu 10% argilă armate cu fibre scurte de carbon (Figura 4-11 b), se remarcă aproape o dublare a valorii conductivității termice pentru concentrația de 25%. Creșterea conductivității termice este evidentă odată cu creșterea gradului de armare cu fibre. Aceasta se datorează în principal proprietăților termice ale fibrelor scurte de carbon.

4.3.Utilizarea rețelelor neuronale artificiale pentru optimizarea proprietăților tribologice

Datorită faptului că procesele tribologice sunt complexe, în predicția proprietăților de frecare și uzură cu ajutorul rețelelor neuronale, este necesară includerea proprietăților mecanice și termice.

Valorile proprietăților mecanice și termice au fost utilizate în perfecționarea modelului neuronal cu scopul predicției proprietăților tribologice pentru anumite concentrații. Modelul permite obținerea concentrațiilor de aditiv pentru anumite proprietăți tribologice optimizate.

În construirea modelului neuronal a fost stabilită arhitectura optimă a rețelei neuronale cu ajutorul algoritmilor genetici.

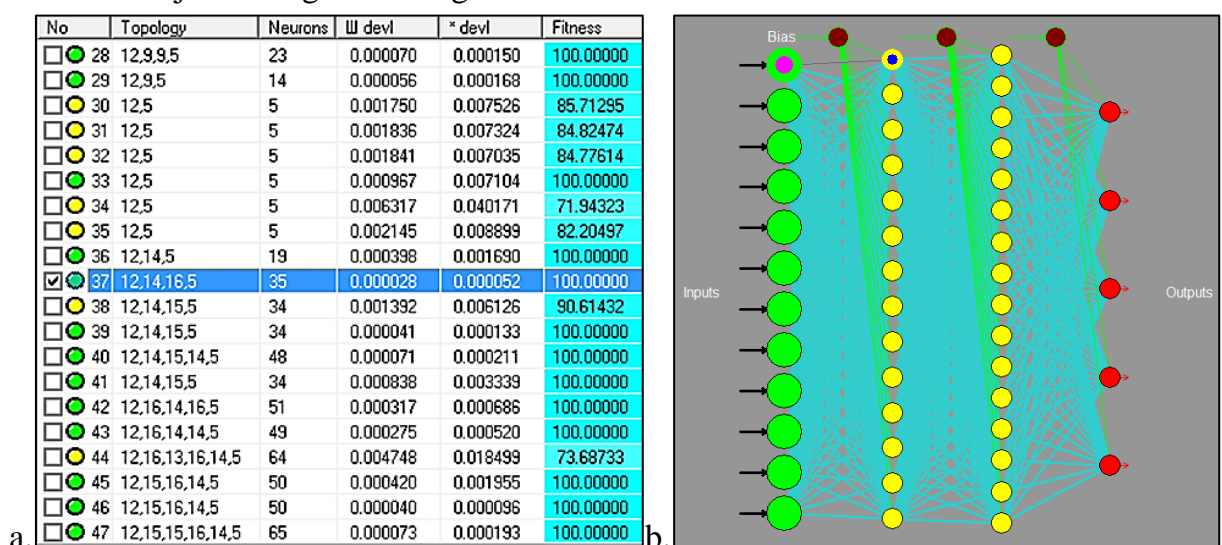


Figura 4-12 Rețeaua neuronală artificială: a. Structura optimizată cu algoritmi genetici; b. Arhitectura rețelei

Rezultatul obținut în urma aplicării algoritmului genetic este reprezentat în Figura 4-12 (a). Varianta cu numărul 37 oferă valorile minime pentru abaterile pătratice medii și maxime. Această topologie a fost aleasă pentru rețeaua modelului neuronal. Astfel, optimul topografiei alese are 2 niveluri ascunse cu 14 și 16 unități neuronale, reprezentată în Figura 4-12 (b).

4.3.1. Analiza interdependenței intrări-ieșiri pentru modelul neuronal artificial

Problematica interdependențelor dintre intrări și ieșiri, în sensul ierarhizării acestora în funcție de gradul de influență asupra ieșirii, a fost tratată pe larg în subcapitolul 3.1.4. Astfel a fost obținută ierarhia prezentată în Figura 4-13. Au fost utilizate două culori: roșie pentru a reprezenta influența fazelor constitutive ale compozitului și albastră pentru a evidenția influența proprietăților mecanice și termice asupra valorilor de ieșire, adică asupra proprietăților tribologice.

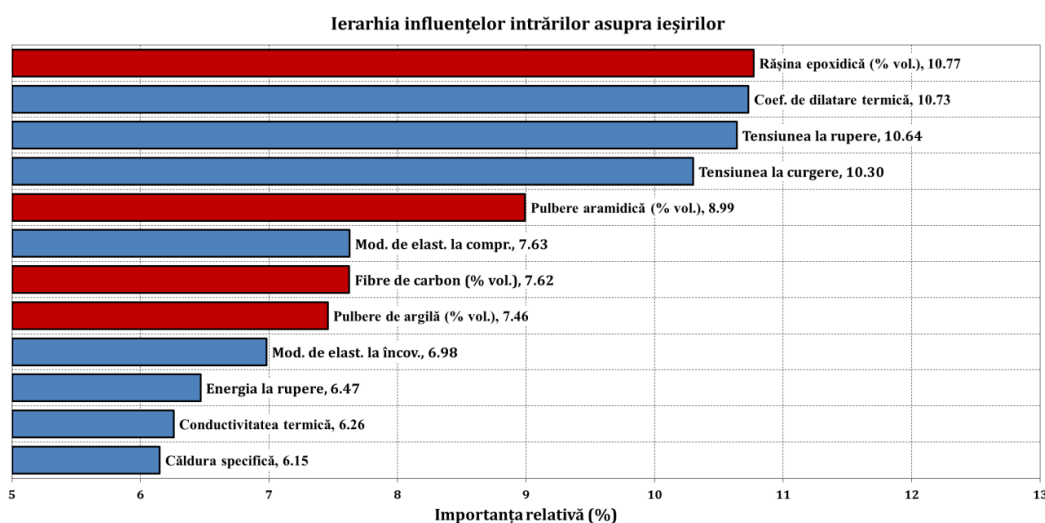


Figura 4-13 Importanța relativă a intrărilor față de ieșiri

Se observă, că importanța cea mai mare, de 10.77%, o are volumul rășinii epoxidice, urmată de o proprietate termică: coeficientul de dilatare cu 10.73% (Figura 4-13). O importanță relativ mare o au proprietățile mecanice: tensiunea la rupere la încovoiere - 10.64% și tensiunea la curgere la compresiune - 10.30%. Influența concentrației agenților de armare se încadrează între 7 - 9%. Cu un factor relativ mic sunt proprietățile termice, și anume conductivitatea termică și căldura specifică, sub 6.5%.

4.3.2. Optimizarea concentrației de aditiv pentru modelul neuronal artificial

Optimizarea concentrației de aditiv a constat în identificarea materialului cu o anumită compoziție care să aibă cel mai mic coeficient de frecare, cea mai mică intensitate de uzură liniară și cea mai mare rezistență la uzură. Astfel, după rularea procesului de optimizare a simulatorului neuronal, pentru condițiile de minim și maxim ale proprietăților tribologice, a fost obținută rețeta cu 72% rășina epoxidică, 23% pulbere aramidică și 5% pulbere de argilă.

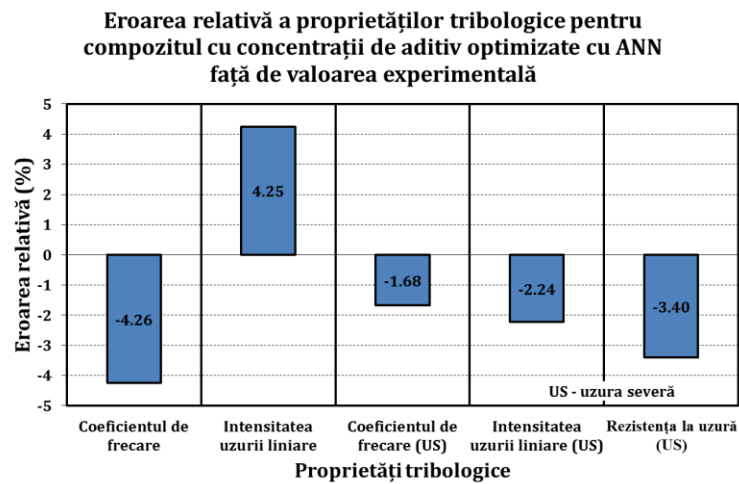


Figura 4-14 Erorile relative ale proprietăților tribologice față de valoarea medie experimentală pentru concentrațiile de aditivi optimizate cu ajutorul rețelei neuronale artificiale

Pentru validarea rezultatului au fost necesare formarea și testarea materialelor cu rețeta dată de ANN. Erorile relative ale proprietăților tribologice față de valoarea medie experimentală sunt reprezentate în Figura 4-14. Se observă că valoarea maximă a erorii relative se plasează în jurul valorii de 4% pentru coeficientul de frecare și intensitatea uzurii liniare aferente testului *bloc pe inel*.

4.4. Concluzii

Analiza proprietăților mecanice și termice, cu scopul de a perfecționa modelul artificial neuronal, a dus la următoarele concluzii:

1. Din punct de vedere mecanic:
 - aditivarea cu pulbere aramidică și armarea cu fibre scurte de carbon a rășinii epoxidice a dus la creșterea modulului de elasticitate la încovoiere și la scăderea tensiunii la rupere și energiei la rupere;
 - comportamentul mecanic la încovoiere al compozitelor aditivate cu pulbere aramidică este datorată proprietăților puternic elastice ale agentului de armare;
 - proprietățile mecanice la compresiune au arătat că agentul de armare duce la scăderea modulului de elasticitate la compresiune și a limitei de curgere pentru ambele clase de compozite;
 - modul de așezare a fibrei scurte de carbon în matrice și interfața fibră – matrice sunt factorii principali ce influențează proprietățile mecanice.
2. Din punct de vedere termic:
 - pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică, coeficientul de dilatare termică scade față de valoarea pentru rășina epoxidică; pentru compozitele armate cu fibre scurte de carbon coeficientul de dilatare termică liniară crește semnificativ, dublându-se valorile;
 - din punct de vedere al căldurii specifice, valorile obținute pentru compozitele studiate au fost mai mari față de rășina epoxidică;
 - în cazul conductivității termice, aditivarea pulberii aramidice a dus la o creștere nesemnificativă, însă la armarea rășinii epoxidice cu fibre scurte de carbon a fost observată creșterea conductivității termice cu 50% pentru 5% fibre și cu aproximativ 100% pentru concentrațiile de 15 și 25% fibre.

Din modelul neuronal artificial perfecționat se desprind următoarele concluzii:

1. cea mai bună topologie pentru parametrii de intrare și ieșire utilizați este de două niveluri ascunse cu 14 și respectiv 16 unități neuronale, soluție dată de algoritmul genetic;
2. validarea rețelei neuronale prin predicția proprietăților tribologice pentru compozitele selectate cu acest scop au arătat erori relative maxime față de valorile medii experimentale de 4.75% și 4.57% în cazul coeficientului de frecare aferent testului *bloc pe inel*;
3. analiza interdependenței intrări – ieșiri a stabilit o ierarhie a parametrilor de intrare cu influențe relative de peste 10% pentru: rata volumică a rășinii epoxidice în compozit, coeficientul de dilatare termică, tensiunea la rupere la încovoiere și limita la curgere la compresiune;
4. optimizarea concentrației de aditiv cu ajutorul modelului neuronal pentru proprietăți tribologice indicate a oferit rețeta cu 72% rășină epoxidică, 23% pulbere aramidică și 5% pulbere de argilă;
5. validarea acestei rețete a dus la o eroare relativă maximă de 4.26% pentru coeficientul de frecare aferent testului *bloc pe inel*.

5. Concluzii generale și contribuții personale

5.1. Concluzii generale

Cercetările în tribologia compozitelor polimerice termorigide reprezintă un interes deosebit datorită domeniilor de aplicabilitate a materialelor. Rășina epoxidică, după cum relevă literatura de specialitate, este cea mai utilizată în formarea compozitelor cu matrice termorigidă. În ceea ce privește agenții de armare și influența lor asupra proprietăților compozitelor, cercetările sunt în continuă dezvoltare, aceștia oferind posibilități nelimitate în acest scop. În paralel cu acestea se pune accent pe dezvoltarea modelelor matematice care încearcă să previzioneze sau să optimizeze comportamentul materialelor compozite.

În urma analizării rezultatelor cercetărilor experimentale prezentate în această lucrare se pot menționa următoarele concluzii:

1. În etapele premergătoare de identificare a compatibilității componentelor au fost încercați mai mulți agenți de dispersie. Pulbera de argilă a fost aleasă ca agent de dispersie pentru fibrele scurte de carbon (0 – 25% vol.).
2. În cazul pulberii aramidice, dispersia în rășina epoxidică a fost omogenă, chiar și la concentrații mari.
3. Cu ajutorul modelelor neuronale artificiale concepute a fost identificată modalitatea optimă de amestec a pulberii de argilă în rășină epoxidică (în prepolimer) și concentrația la care proprietățile compozitului final nu se modifică semnificativ față de rășina epoxidică (10% vol.).
4. Evaluarea proprietăților tribologice prin prisma regimului de testare au condus atât la identificarea unor procese și fenomene caracteristice fiecărei clase de compozite cât și stabilirea influenței agenților de armare în funcție de regimul de testare.
5. În urma evaluării rezultatelor obținute la testul de uzură severă a rezultat că odată cu creșterea volumului de pulbere aramidică intensitatea uzurii liniare și coeficientul de frecare scad, și respectiv crește rezistența la uzură. Pentru compozitele cu 10% argilă armate cu diferite concentrații de fibre scurte de carbon se observă o creștere a intensității uzurii liniare odată cu creșterea

gradului de armare, de asemenea, crește și coeficientul de frecare și respectiv scade rezistența la uzură.

6. Atât testele *bloc pe inel* cât și *știft pe disc* au arătat un comportament net superior pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică față de cele cu fibre de carbon.
7. Optimizarea concentrației de aditiv cu ajutorul modelelor neuronale artificiale a fost făcută pentru proprietățile tribologice indicate (coeficientul de frecare minim și rezistență la uzură maximă). Astfel, au fost obținute două compozite cu concentrații optime de aditiv, corespunzătoare testelor aplicate:
 - 1) Pentru testul *bloc pe inel* 78.4% rășină epoxidică, 15.4% pulbere aramidică și 6.2% pulbere de argilă;
 - 2) Pentru testul *știft pe disc* 70% rășină epoxidică, 25% pulbere aramidică și 5% pulbere de argilă.
8. În analiza interdependenței intrări-ieșiri se remarcă influența relativ mare a raportului volumic de fibre scurte de carbon, urmată de pulberea aramidică și volumul rășinii epoxidice. Aceasta demonstrează că interdependențele reprezentate de simulatorul neuronal nu se limitează la valorile numerice, ci sunt situate la nivel fenomenologic.
9. În procesul de validare a rezultatelor optimizării au fost create materialele cu concentrațiile date de rețeaua neuronală și ulterior testate. Erorile relative față de valorile medii experimentale obținute au fost de maxim 17%, considerându-se a fi o eroare mare. De aceea s-a considerat a fi necesar îmbunătățirea rețelei.

Ținând cont de faptul că un proces tribologic reprezintă sinergia unor procese complexe a fost necesară îmbunătățirea modelului neuronal cu proprietăți mecanice și termice. Analiza proprietăților mecanice și termice, cu scopul de a perfecționa modelul artificial neuronal, a dus la următoarele concluzii:

10. Aditivarea cu pulbere aramidică și armarea cu fibre scurte de carbon a rășinii epoxidice a dus la creșterea modulului de elasticitate la încovoiere și la scăderea tensiunii și energiei la rupere.
11. Proprietățile mecanice la compresiune au arătat că agentul de armare duce la scăderea modulului de elasticitate la compresiune și a limitei de curgere.
12. Pentru compozitele aditivate cu pulbere aramidică, coeficientul de dilatare termică scade față de rășina epoxidică, iar pentru compozitele armate cu fibre scurte de carbon – crește semnificativ, dublându-se valorile.
13. Valorile căldurii specifice obținute pentru compozitele studiate au fost mai mari față de valoarea pentru rășina epoxidică.
14. În cazul conductivității termice, aditivarea cu pulbere aramidică a dus la o creștere nesemnificativă. În cazul compozitelor armate cu fibre scurte de carbon a fost observată creșterea conductivității termice cu 50% pentru 5% fibre și cu aproximativ 100% pentru concentrațiile de 15 și 25% fibre.

Din modelul neuronal artificial perfecționat se desprind următoarele concluzii:

15. Cea mai bună topologie pentru rețeaua neuronală vizată, este de două niveluri ascunse cu 14 și respectiv 16 unități neuronale, soluție dată de algoritmul genetic.
16. Validarea rețelei neuronale prin predicția proprietăților tribologice pentru compozitele selectate cu acest scop au arătat erori relative maxime față de valorile medii experimentale de 4.75% și 4.57%.
17. Analiza interdependenței intrări – ieșiri a stabilit o ierarhie a parametrilor de intrare cu influențe relative de peste 10% pentru: concentrația volumică a

rășinii epoxidice în compozit, coeficientul de dilatare termică, tensiunea la rupere la încovoiere și limita la curgere la compresiune.

18. Optimizarea concentrației de aditiv cu ajutorul modelului neuronal pentru proprietăți tribologice indicate a oferit rețeta cu 72% rășină epoxidică, 23% pulbere aramidică și 5% pulbere de argilă.

19. Validarea acestei rețete a dus la o eroare relativă maximă de 4.26%.

5.2. Contribuții personale

În urma desfășurării cercetărilor asupra comportamentului tribologic a compozitelor polimerice termorigide se evidențiază următoarele contribuții originale:

1. Realizarea unei documentații la zi asupra comportării tribologice a compozitelor polimerice termorigide.
2. Proiectarea, pe baza documentației studiate, a unei clase de compozite cu matrice epoxidică, pulbere de argilă, pulbere aramidică și fibre scurte de carbon.
3. Conceperea unei metode originale de formare a materialelor compozite.
4. Realizarea unor materiale compozite, pornind de la rețete originale.
5. Elaborarea unei metodologii de testare a materialelor compozite termorigide;
6. Obținerea unui set extensiv de date experimentale referitoare la proprietățile mecanice, termice și tribologice a compozitelor studiate
7. Construirea și validarea unor modele, bazate pe rețele neuronale, pentru simularea și optimizarea concentrațiilor de aditiv optime;
8. Realizarea și testarea unor materiale compozite optimizate, pornind de la rețete stabilite prin utilizarea simulatoarelor neuronale.
9. Publicarea la conferințe internaționale și în reviste de specialitate a unui număr de 23 lucrări științifice pe subiectul tezei, dintre care 4 ca prim autor:
 - a. Lucrări indexate ISI – 3;
 - b. Lucrări indexate BDI – 8;
 - c. Lucrări publicate la conferințe internaționale – 12.

Bibliografie

- [1] **C Marton and R Marton**, *Methods of Experimental Physics, Polymers Molecular Structure and Dynamics*, ISBN 0-12-4759-5, Academic Press Inc., 1980, vol. 16.
- [2] **U W Gedde**, *Polymer Physics*, ISBN 0-412-59020-4, Chapman & Hall, 1995.
- [3] **L H Sperling**, *Introduction to Physical Polymer Science*, ISBN 0-471-70606-9, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [4] **G. Strobl**, *The Physics of Polymer, Concepts for Understanding Their Structures and Behavior*, ISBN 978-3-540-25278-8, Springer, 2007.
- [5] **L. C. Sawyer, D. T. Grubb, and G. Meyers**, *Polymer Microscopy*, ISBN 978-0-387-72627-4, Springer, 2008.
- [6] **S. Mazumdar**, *Opportunities for termostet resin in the composites industry*, Trends and Forcasts in Global Thermosets Resin Market 2008-2013, pp. 50-62, 2010.
- [7] **Hui Zhang and Zhong Zhang**, *Comparison of short carbon fibre surface treatment on epoxy composites*, Composites Science and Technology, vol. 64, pp. 2031-2038, April 2004.
- [8] **D. Callister**, *Materials Science and Engineering*, ISBN: 978-0-471-73696-7, John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [9] *Pollymer Materials. Block-Copolymers, Nanocomposites, Organic/Inorganic Hybrids.*, K. **S. Lee and S Kobayashi**, Eds., ISSN 0065-3195, Springer, 2010.
- [10] *Particulate-Filled Polymer Composites*, **R. N. Rethon**, Ed., ISBN: 1-85957-382-7, Rapra Technology Limited, 2003.
- [11] **M. Rîpă and L. Tomescu**, *Elemente de Tribologie*, ISBN 973-627-104-8, Fundației Universitare "Dunărea de Jos", 2004.
- [12] **H. Czichos**, *Tribology Series, 1. A System Aproach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, ISBN 0-444-41676, ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, 1978.
- [13] **D. Bukley**, *Tribology Series, 5, Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication*, ISBN: 044441966-7, ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, 1981.
- [14] **Dan Pavelescu, Mihai Mușat, and Andrei Tudor**, *Tribologie*, Didactică și Pedagogică București, 1977.
- [15] *The Tribology Handbook*, **M. J. Neale**, Ed., ISBN 0 7506 11 98 7, Butterworth-Heinemann, 1995.
- [16] **Bushan Bharat**, *Nanotribology and Nanomechanics II*, ISBN 978-3-642-15262-7, Springer, 2011.
- [17] **Hui Zhang, Zhong Zhang, and Klaus Friedrich**, *Effect of fibre length on the wear resistance of short carbon fiber reinforced epoxy composites*, Composites Science and Technology, vol. 67, pp. 222-230, October 2007.
- [18] *Polymer Tribology*, **S. K. Sihna and B. J. Briscoe**, Eds., ISBN: 978-1-84816-202-0, Imperial College Press, 2009.
- [19] **M. S. Bhagyashekar**, *Effects of material and test parameters on the wear bwhavior of particulate filled composites. Part1: SiC-Epoxy and Gr-Epoxy composites*, Reinforced Plastics and Composites, vol. 26, no. 17, pp. 1753-1769, 2007.
- [20] **G. Xian, R. Walter, and F. Hauptert**, *Friction and wear of epoxy/TiO2 nanocomposites: Influence of additional short carbon fibres, Aramid and PTFE particles*, Composites Science and Technology, vol. 66, pp. 3199-3209, April 2006.
- [21] **Z. Zhang, C. Breidt, L. Chang, F. Hauptert, and K. Friedrich**, *Enhancement of wear*

- resistance of epoxy: short carbon fibre, graphite, PTFE and nano- TiO₂*, Composites, vol. Part A, no. 35, pp. 1385-1392, May 2004.
- [22] **Z. Gahr and K. Heinz**, *Microstructure and Wear of Materials*, Tribology Series Vol.10, Ed., ISBN: 0-444-42754-6, Elsevier, 1987.
- [23] **U. S. Tewari, J. Bijwe, J. N. Mathur, and I. Sharma**, *Studies on abrasive wear of carbon fiber (short) reinforced polyamide composites*, Tribology International, vol. 25, pp. 53-60, 1992.
- [24] **G. Stachowiak and A. Batchelor**, *Engineering Tribology*, ISBN: 0-7506-7836-4, Elsevier, 2005.
- [25] **T. O. Larsen, T. L. Andersen, B. Thorning, A. Horsewell, and M. E. Vigild**, *Changes in the tribological behavior of an epoxy resin by incorporating CuO nanoparticles and PTFE microparticles*, Wear, vol. 265, pp. 203-213, 2008.
- [26] **A. Sidorenko, A. S. Ahn, D. I. Kim, H. Yang, and V. V. Tsukruk**, *Wear stability of polymer nanocomposite coatings with trilayer architecture*, Wear, vol. 252, pp. 946-955, 2002.
- [27] **G. Shi, M. Q. Zhang, M. Z. Rong, B. Wetzel, and K. Friedrich**, *Sliding wear behavior of epoxy coating nano-Al₂O₃ particles of different pretreatments*, Wear, vol. 256, pp. 1072-1081, 2004.
- [28] **B. Wetzel, F. Hauptert, and M. Q. Zhang**, *Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance*, Composites Science and Technology, vol. 63, pp. 2055-2067, March 2003.
- [29] **V. Marusic, I. Vitez, and B. Nedi**, *Abrasive wear resistance of glass fiber reinforced polyester laminates*, Metalurgija, vol. 47, no. 4, pp. 351-355, March 2008.
- [30] **Jamal Takadoum**, *Materials and Surface Engineering in Tribology*, ISBN: 978-1-84821-067-7, Wiley, 2008.
- [31] **X. Ning**, *Analysis of the Tribological Behavior in Transversely Isotropic Materials Utilizing Analytical and Finite Element Methods*, University of Pittsburgh, Doctoral Thesis, 2002.
- [32] *Tribology Research Trends*, **T. Hasegawa**, Ed., ISBN 978-1-60876-331-3, Nova Science Publishers, Inc., 2008.
- [33] **H. E. Kadi and Y. Al-Assaf**, *Prediction of fatigue life for unidirectional glass fiber/epoxy composite laminae using different neural network paradigms*, Composite Structures, vol. 55, pp. 239-246, 2002.
- [34] **S. W. Choi, E. J. Song, and H. T. Hahn**, *Prediction of fatigue damage growth in notched composite laminates using an artificial neural network*, Composites Science and Technology, vol. 63, pp. 661-675, 2003.
- [35] **I. I. Kudish and M. J. Covitch**, *Modeling and Analytical Methods in Tribology*, ISBN: 978-1-4200-8701-7, Taylor and Francis Group, LLC, 2010.
- [36] **L. A. Sosnovskiy**, *Tribo-Fatigue, Wear-Fatigue Damage and its Prediction*, ISBN 3-540-23153-6, Springer, 2005.
- [37] **A. Suresh, A. P. Harsha, and M. K. Ghosh**, *Solid particle erosion studies on polyphenylene sulfide composites and prediction on erosion data using artificial neural networks*, Wear, vol. 266, pp. 184-193, July 2009.
- [38] **M.K. Ciliz and M. Tomizuka**, *Friction modelling and compensation for motion control using hybrid neural network models*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 20, pp. 898-911, February 2007.
- [39] **J. Matusko, I. Petrovic, and N. Peric**, *Neural network based tire/road friction force*

- estimation*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007.
- [40] **B. Muller, J. Reinhardt, and M. T. Strickand**, *Neural Network. An Introduction*, ISBN: 3-540-60207-0, Springer, 1995.
- [41] **P. Zeng**, *Neural computing in mechanics*, Applied Mechanics Reviews, vol. 51, pp. 173-197, 1998.
- [42] **Z. Zhang and K. Friedrich**, *Artificial neural networks applied to polymer composites: a review*, Composite Science Technology, vol. 63, pp. 2029-2044, 2003.
- [43] **H. E. Kadi**, *Modelling the mechanical behavior of fiber-reinforced polymeric composite materials using artificial neural networks*, Composite Structures, vol. 73, pp. 1-23, 2006.
- [44] **D. Aleksendric and C. Duboka**, *Prediction of automotive friction material characteristics using artificial neural networks-cold performance*, Wear, vol. 261, pp. 269-282, 2006.
- [45] **Z. Zhang, K. Friedrich, and K. Velten**, *Prediction on tribological properties of short fibre composites using artificial neural network*, Wear, vol. 252, pp. 668-675, January 2002.
- [46] **Z. Jiang, L. A. Gyurova, K. Scharb, K. Friedrich, and Z. Zhang**, *Study of friction and wear behavior of polyphenylene sulfide composites reinforced by short carbon fibers and sub-micro TiO₂ particles*, Composites Science and Technology, vol. 68, pp. 734-742, October 2008.
- [47] **A. Cîrciumaru Bria, V., Roman, I., Andrei, G., Dima, D., Bîrsan, I.G** *Physical properties of filled epoxy composites*, Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity", pp. 59-60, 2011.
- [48] **I.G. Bîrsan, I. Roman, V. Bria, V. Ungureanu, and A. Cîrciumaru**, *Starch - epoxy composites*, Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity", pp. 285-286, 2011.
- [49] **V. Ungureanu, I. Roman, V. Bria, I.G. Bîrsan , and A. Cîrciumaru**, *Tribological comparison of some particulate composites*, 12th International Conference on Tribology SERBIATRIB, pp. 190-193, 2011.
- [50] **V. Bria, I. Roman, I. Postolache, I.G. Bîrsan, and A. Cîrciumaru**, *Mechanical and dielectric properties of stratified composites*, The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați, Technologies in Machine Building, vol. Fascicle V, pp. 311-314, 2009.
- [51] **Q. H. Zheng, A. B. Yu, G. Q. Lu, and D. R. Paul**, *Clay-based polymer nanocomposites research and commercial development*, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, no. 5, pp. 1574-1582, 2005.
- [52] **M. Kawasumi**, *The discovery of polymer-clayhybrids*, Journal of Polymer Science, vol. Part A, pp. 819-825, 2004.
- [53] **V. Bria, I. Roman, I. Postolache, I.G. Bîrsan, and A. Cîrciumaru**, *Mechanical properties of filled epoxy based reinforced composites*, The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați, Technologies in Machine Building, vol. Fascicle V, pp. 315-318, 2009.
- [54] **I. G. Bîrsan, G. Andrei, V. Ungureanu , I. Roman, and A. Cîrciumaru**, *Wear behavior of fabric reinforced epoxy based composites*, Proceedings V International Scientific Conference BALTRTRIB, pp. 158-163, November 2009.
- [55] **I. Roman, V. Bria, I. Postolache, A. Cîrciumaru, and I.G. Bîrsan**, *Thermo-Mechanical properties of fabric reinforced composites with filled epoxy matrix*, Fiability &

- Durability, no. 2, pp. 53-56, 2010.
- [56] **I. G. Bîrsan, A. Cîrciumaru, V. Bria, I. Roman, and V. Ungureanu**, *Mecahnical characterisation of fiber fabrics*, Proceedings of the ASME 10th Bial Conference on Engineering System, Design and Analysis, vol. 1, pp. 671-674, 2010.
- [57] **V. Bria, I.G. Bîrsan, A. Cîrciumaru, V. Ungureanu, and I. Roman**, *Tribological characterisation of particulate composites*, Proceedings of the ASME 10th Bial Conference on Engineering System, Design and Analysis, vol. 1, pp. 675-678, 2010.
- [58] **V. Ungureanu, V. Bria, I. Roman, I.G. Bîrsan, and A. Cîrciumaru**, *Mechanical analysis of fabric reinforced epoxy laminae*, International Conference of Polymer Composites, pp. 127-130, 2011.
- [59] **I. Roman, V. Bria, V. Ungureanu, A. Cîrciumaru, and I.G. Bîrsan**, *Tribological analysis of fabric reinforced composites*, The 7th International Scientific Conference Research and Development of Mechanical Elements and System, pp. 359-362, 2011.
- [60] **V. Ungureanu, I. Roman, V. Bria, I.G. Bîrsan, and A. Cîrciumaru**, *Physical properties of clay-talc/epoxy composites*, The 7th International Scientific Conference Research and Development of Mechanical Elements and System, pp. 363-366, 2011.
- [61] **I.G. Bîrsan, A. Cîrciumaru, V. Bria, I. Roman, and V. Ungureanu**, *Some mechanical properties of reinforced filled epoxy composites*, Annals of DAAAM for 2010 & Prodeedings of the 21st International DAAAM Symposium, pp. 379-380, 2010.
- [62] **V. Bria, I. Roman, V. Ungureanu, A. Cîrciumaru, and I. G. Bîrsan**, *Thermal properties of particulate epoxy composites*, Fiability & Durability , no. 1, pp. 47-50, 2010.
- [63] **I. Roman, V. Ungureanu, V. Bria, A. Cîrciumaru , and I.G. Bîrsan**, *Starch epoxy composites a study of starch amount influence*, 12th International Conference on tribology SERBIATRIB, pp. 181-184, 2011.
- [64] **W. Groenewoud**, *Characterisation of Polymers by Thermal Analysis*, ISBN: 0-444-50604-7, Elsevier Science B.V., 2001.
- [65] *Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry. Theoretical and Practical Applications in Polymer Characterisation*, **M. Reading and D. J. Hourston**, Eds., ISBN: 1-4020-3750-3, Springer, 2006.
- [66] **R. Riesen**, *Application Handbook. Thermal Analysis. Thermosets. Volum 1* , Mettler Toledo Collected Applications, 2006.
- [67] **R. Reisen**, *Application Handbook. Thermal analysis. Thermosets. Vol. 2*, Mettler Toledo Collected Applications, 2006.
- [68] **R. Reijen**, *Simple determination of the thermal conductivity of polymers by DSC*, UserCom – Information for users, Mettler Toledo Thermal analysis systems, vol. 22, pp. 19-22, 2005.
- [69] **Y. P. Khanna, T. J. Taylor, and G. Chomyn**, *New differential scanning calorimetry based approach for the estimation of the thermal conductivity of polymer solids and melts*, Polymer Engineering and Science, vol. 28, pp. 1034-1041, 1988.
- [70] **M. Y. Keating and C. S. McLaren**, *Thermal conductivity of polymer melts*, Thermochemica Acta, vol. 166, pp. 69-76, 1990.
- [71] **J. E. Landbury, B. R. Currell, J. R. Horder, J. R. Parsonage, and E. A. Vidgeon**, *Application of DSC for the measurement of the thermal conductivity of elastomeric materials*, Thermochemica Acta, vol. 169, pp. 39-45, 1990.
- [72] **M. Merzlyakov and C. Schick**, *Thermal conductivity from dynamic response of DSC*, Thermochemica Acta, vol. 377, pp. 183-191, 2001.
- [73] **J. H. Flynn and D. M. Levin**, *A method for the determination of thermal conductivity of*

- sheet materials by differential scanning calorimetry (DSC)*, *Thermochimica Acta*, vol. 126, pp. 93-100, 1988.
- [74] **J.R. Rabunal and J. Dorado**, *Artificial Neural Networks in Real-Life Applications*, ISBN 1-59140-904-7, Idea Group Publishing, 2006.
- [75] **L.P.J. Veelenturf**, *Analysis and Applications of Artificial Neuronal Networks*, ISBN: 0-13-489832-X, Prentice Hall Inc., 1995.
- [76] **E. Kussul, T. Baidyk, and D.C. Wunsch**, *Neural Networks and Micromechanics*, ISBN: 978-3-642-02535-8, Springer, 2010.
- [77] **B. Krose and P. Van Der Smagt**, *An Introduction to Neural Network*, ISBN: 978-0890068809, University of Amsterdam, 1996.
- [78] **N. K. Kasabov**, *Foundation of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering*, ISBN: 0-262-11212-4, MIT Press, 1998.
- [79] **D. Anderson and G. McNeill**, *Artificial Neural Networks Technology*, ISBN: 13502-4627, Kaman Sciences Corporation, 1992.
- [80] **D. Dumitrescu and H. Costin**, *Rețele Neuronale, Teorie și Aplicații*, București, Teora, 10996.
- [81] **J.A. Lee, D.P. Almond, and B. Harris**, *The use of neural network for the prediction of fatigue lives of composite materials*, *Composite Part A*, vol. 30, pp. 1159-1169, July 1999.
- [82] **M. T. Hagan, H. B. Demuth, and M. Beale**, *Neural Network Design*, ISBN: 7-111-10841-8, PWS Publishing Company, 1996.
- [83] **A.I. Galushkin**, *Neural Networks Theory*, ISBN 978-3-540-48124-9, Springer, 2007.
- [84] *Methods and Procedures for the Verification of Artificial Neural Networks*, B.J. Taylor, Ed., ISBN: 978-0-387-29485-8, Springer, 2006.
- [85] **V. Ungureanu, V. Bria, I. Roman, I.G. Bîrsan, and A. Cîrciumaru**, *Some properties of starch filled epoxy*, *International Conference of Polymer Composites*, pp. 123-126, 2011.
- [86] **D.S. Yeung, I. Cloete, D. Shi, and W. W. Y. Ng**, *Sensitivity Analysis for Neural Network*, ISBN: 978-3-642-02532-7, Springer, 2010.
- [87] **I. Roman, V. Bria, V. Ungureanu, A. Cîrciumaru, and I.G. Bîrsan**, *Physical properties of starch filled epoxy composites*, *Proceedings of 10th International Conference Research and Development in Mechanical Industry RaDMI*, pp. 312-318, 2011.