

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

EFFECTUL SINERGIC AL PROCESELOR

DE UZARE ȘI OBOSEALĂ ASUPRA

DEGRADĂRII MATERIALELOR

POLIMERICE

Doctorand,

Ing. Costel HUMELNICU

Conducător științific,

Prof. univ. dr. ing. Ec. Elena MEREUȚĂ

Seria I6: Inginerie mecanică Nr. 59

GALAȚI

2021

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT
EFFECTUL SINERGIC AL PROCESELOR
DE UZARE ȘI OBOSEALĂ ASUPRA
DEGRADĂRII MATERIALELOR
POLIMERICE

Doctorand,

Ing. Costel HUMELNICU

Președinte,

Prof. univ. dr. ing. Eugen-Victor-Cristian RUSU
Director CSUD - Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Conducător științific,

Prof univ. Dr. Ing. Ec. Elena MEREUȚĂ
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Referenți științifici:

Prof. univ. dr. ing. Anton HADĂR
Universitatea POLITEHNICA din București

Prof. univ. dr. ing. Ioan Călin ROȘCA
Universitatea „Transilvania” din Brașov

Prof. univ. dr. ing. Mihaela BUCIUMEANU
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Seria I6: Inginerie mecanică Nr. 59

GALAȚI

2021

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

Domeniul fundamental ȘTIINȚE INGINEREȘTI

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

Domeniul fundamental ȘTIINȚE SOCIALE

- Seria E 1: **Economie**
- Seria E 2: **Management**
- Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE UMANISTE ȘI ARTE

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

Domeniul fundamental MATEMATICĂ ȘI ȘTIINȚE ALE NATURII

- Seria C: **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE BIOLOGICE ȘI BIOMEDICALE

- Seria M: **Medicină**

Cuprins

Cuprins	5
Capitolul 1.....	7
Introducere	7
1.1 Motivarea alegerii temei și obiectivele tezei de doctorat	7
1.2 Stadiul actual al cercetărilor în domeniul materialelor polimerice termorigide	8
1.2.1 Materiale polimerice termorigide	8
1.2.1.1 Fenolii	8
1.2.1.2 Poliamidele	8
1.2.1.3 Poliimidele	8
1.2.1.4 Poliuretanii	9
1.2.1.5 Rășinile epoxidice	9
1.2.2 Utilizări ale materialelor polimerice termorigide	9
1.2.3 Solicitări principale la care sunt supuse materialele polimerice termorigide	10
1.2.3.1 Solicitări la oboseală	10
1.2.3.2 Solicitări la uzare	11
1.2.3.3 Solicitări compuse - oboseală cu uzare	11
1.3 Concluzii parțiale	12
Capitolul 2.....	13
Metodologie pentru testarea materialelor polimerice pe bază de rășini epoxidice la solicitări compuse de oboseală cu uzare.....	13
2.1 Metode de investigare și determinare a oboselii	13
2.1.1 Dispozitive utilizate pentru încercări la oboseală	15
2.1.2 Soluție constructivă propusă	15
2.2 Metodologie de încercare la oboseală cu uzare	17
2.2.1 Standuri utilizate pentru încercări la solicitări compuse	18
2.2.2 Soluție constructivă propusă	18
2.3 Materiale și procedee utilizate	19
2.3.1 Materiale supuse testării	19
2.3.2 Descrierea procedeeului de obținere a epruvetelor	19
2.4 Planificarea și efectuarea testelor	20
2.5 Concluzii parțiale	21
Capitolul 3.....	23
Rezultate obținute	23
3.1 Încercări la oboseală	23
3.1.1 Influența metodei de polimerizare asupra rezistenței la oboseală	23

3.1.2	Influența aditivilor asupra rezistenței la oboseală.....	25
3.2	Încercări la oboseală cu uzare	29
3.2.1	Cuple polimer-polimer	29
3.2.2	Cuple polimer-metal	33
3.3	Concluzii parțiale	37
Capitolul 4.....		39
Modelarea proceselor de oboseala cu uzare cu ajutorul rețelelor neuronale		39
4.1	Rețele neuronale	39
4.2	Bazele modelării cu rețele neuronale.....	40
4.3	Modelarea proceselor de oboseală cu uzare.....	40
4.3.1	Identificarea perechilor de date intrare-ieșire cunoscute	40
4.3.2	Alegerea și optimizarea arhitecturii rețelei.....	40
4.3.3	Antrenarea și validarea rețelei	40
4.3.4	Analiza importanței și sensibilității	42
4.3.5	Predicție.....	42
4.3.6	Optimizare	42
4.4	Concluzii parțiale	43
Capitolul 5.....		45
Concluzii generale, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare		45
5.1	Concluzii generale	45
5.2	Contribuții personale.....	47
5.3	Direcții viitoare de cercetare.....	48
Bibliografie.....		53

Cuvinte cheie: oboseala materialelor, uzura materialelor, polimeri, rășini epoxidice, rețele neuronale

Capitolul 1

Introducere

1.1 Motivarea alegerii temei și obiectivele tezei de doctorat

Asistăm la un salt în ceea ce privește dezvoltarea tehnologiei, creat datorită dezvoltării materialelor polimerice și avântului pe care l-a luat această industrie în ultimii ani.

Făcând o comparație între materialele consacrate, precum metalele feroase sau neferoase, lemnul, ceramica, piatra etc. și materialele polimerice, se observă că acestea din urmă au o serie de avantaje cum ar fi: masă volumică redusă, conductivitate electrică optimizată, bune izolatoare termice, au rezistență ridicată la coroziune și agenți chimici, preț scăzut etc.

Din punct de vedere al comportării la solicitări termice, materialele polimerice se împart în două categorii: materiale polimerice termoplastice (la încălzire își pot modifica starea și forma) și materiale polimerice termoreactive, numite și termorigide (care nu mai pot fi topite și reutilizate după turnare).

Rășinile epoxidice fac parte din categoria polimerilor termorigizi, iar datorită proprietăților mecanice, electrice și chimice superioare, sunt printre cele mai folosite în realizarea materialelor compozite. Proprietățile compozitelor care au în componență rășini epoxidice depind de agentul de întărire, precum și de cantitatea volumică sau masică utilizată, dar și de materialele folosite pentru armare.

În această lucrare, am studiat durata de viață a unor materiale polimerice epoxidice, sub acțiunea simultană a oboselii cu uzură. Studiul a vizat determinarea gradului de influență a uzurii asupra oboselii sau cât și cum influențează acțiunea simultană a celor două solicitări, durata de viață a materialelor studiate.

Pentru a realiza acest studiu s-au folosit epruvete cilindrice confecționate din rășină epoxidică pură și epruvete aditivă cu pulberi de aramidă sau ulei mineral, acestea fiind supuse unor tratamente termice. Rezultatele studiilor efectuate sunt utilizate ca date de intrare într-un soft care folosește rețele neuronale pentru predicția duratei de viață a materialelor supuse testărilor.

În vederea atingerii obiectivului principal al prezentei tezei de doctorat am stabilit o serie de obiective subsecvente:

- analiza stadiului actual al cercetărilor privind materialele polimerice termorigide;
- realizarea unui stand experimental pentru încercări la oboseală și oboseală cu uzare;
- prepararea epruvetelor din rășină epoxidică;
- aditivarea rășinii epoxidice în vederea îmbunătățirii proprietăților mecanice;
- conceperea și validarea unui model neuronal pentru predicția și optimizarea comportamentului la oboseală și oboseală prin uzare a rășinilor epoxidice termorigide.

Pentru obținerea unor rezultate și concluzii, cu implicații asupra efectului sinergic al proceselor de uzare și oboseală asupra degradării materialelor polimerice, am aplicat o serie de metode generale de cercetare, dar și specifice ingineresti:

- metoda documentării, pentru studiul cercetărilor în domeniul materialelor polimerice;

- metoda observației, pentru a observa și analiza comportamentul la oboseală și oboseală cu uzare a rășinilor epoxidice termorigide;
- metode matematice specifice, pentru a identifica și a caracteriza comportamentul eșantioanelor de epruvete la oboseală și oboseală cu uzare;
- metode experimentale pentru predicția și optimizarea comportamentului la oboseală și oboseală cu uzare a rășinilor epoxidice termorigide.

1.2 Stadiul actual al cercetărilor în domeniul materialelor polimerice termorigide

1.2.1 Materiale polimerice termorigide

Polimerii termorigizi sunt formați printr-o reacție de reticulare care facilitează legarea chimică între lanțurile macromoleculare, creând o rețea tridimensională [1]. Acești polimeri, odată formați, nu pot fi reutilizați sau remodelați prin încălzire, cum se întâmplă în cazul polimerilor termoplastici. Materialele polimerice termorigide se găsesc de cele mai multe ori sub formă lichidă și sunt printre cele mai folosite în crearea compozitelor armate cu fire și fibre, pulberi etc [2], [3],[4],[5].

Din categoria celor mai utilizați polimerilor termorigizi fac parte:

- Fenolii;
- Poliaminele;
- Poliiimidele;
- Poliuretanii;
- Rășinile epoxidice.

1.2.1.1 Fenolii

Fenolii sunt o clasă de compuși organici ce au un nucleu aromatic. În structura lor pot intra una sau mai multe grupe de hidroxil ($-OH$) legate (grefate) pe nucleu. Prin combinația de fenol cu formaldehidă și printr-un procedeu numit reacție de condensare a apărut primul material polimeric, având o culoare opacă, cunoscut și cu denumirea de bachelită, după cel care a inventat-o, Leo Baekeland în anul 1907 [6], [7].

1.2.1.2 Poliamidele

Poliaminele sunt polimeri care au în componența lor un grup amino ($-NH_2$), iar prin reacția de condensare între atomii de hidrogen din fiecare grup cu moleculele de aldehydă rezultă un material polimeric cu proprietăți total diferite. Aminoplastele sunt formate din uree-formaldehidă (UF), melamină-formaldehidă (MF) și melamină-uree-formaldehidă (MUF) [8],[9].

Rășinile poliaminice UF , MF sau MUF , se pot amesteca cu diverși aditivi, pigmenți sau materiale de umplură precum celuloza, lemnul sau rumegușul [10]. Produsele finite sunt obținute prin încălzirea amestecului și turnarea acestuia în matrițe prin injectare, presare sau sinterizare [11],[12].

1.2.1.3 Poliiimidele

Poliimidele (PI) sunt rășini sintetice, fac parte din categoria polimerilor termorezistenți și sunt utilizate ca rășini matriciale în compozite armate cu fibre [13]. Avantajele pe care le posedă rășinile și compozitele pe bază de poliimide sunt:

- raport mare rezistență/greutate [14];
- stabilitate termică la temperaturi de până la $500^\circ C$ [15];
- proprietăți mecanice ridicate [16],[17];
- bune proprietăți dielectrice [18],[19];

- rezistente la lumină și absorbție de apă [20].

1.2.1.4 Poliuretanii

Poliuretanii (*PU*) sunt polimeri organici, care se formează prin reacția unui polioliol (un alcool cu mai mult de două grupări hidroxil reactive pe moleculă) și un diizocianat sau un izocianat polimeric, în prezența aditivilor adecvați și a catalizatorilor [21]. Poliuretanii sunt o clasă versatilă de polimeri cu un control deosebit asupra proprietăților lor fizico-chimice pe baza compoziției chimice [22].

1.2.1.5 Rășinile epoxidice

Rășinile epoxidice sunt substanțe chimice reactive de natură sintetică, aflate în stare lichidă, iar pentru realizarea unor produse finite trebuie să fie reticulate (întărite) prin polimerizare, împreună formând o rețea tridimensională. După polimerizare, se produce un grad crescut de reticulare, astfel natura legăturilor intercatenare dă epoxizilor caracteristici deosebite [23]. Reticularea se face cu ajutorul unor agenți de întărire sau întăritori compatibili, rezultând un solid, din care se poate realiza produse termorezistente cu proprietăți prestabilite.

Rășinile epoxidice sunt utilizate ca matrice într-un număr mare de compozite, datorită proprietăților acestora de adeziune la diverse materiale și a numărului mare de compuși care pot reacționa cu inelul epoxidic pentru a forma sisteme de rășini cu o gamă foarte largă de proprietăți.

Tabelul 1.1 prezintă într-o formă rezumată avantajele și dezavantajele rășinilor epoxidice.

Tabelul 1. 1. Avantajele și dezavantajele rășinilor epoxidice [24]

Avantaje	Dezavantaje
Aderență crescută pe o mare varietate de materiale	Necesită un timp lung de polimerizare
Contrație mică în comparație cu alte materiale (aproximativ 1% comparativ cu 6% al poliesterului)	Sensibile la crăpături
Prezintă proprietăți bune, în special într-un mediu umed	Preț ridicat
Rezistență chimică ridicată	Condiții de utilizare foarte stricte
Rezistență bună la temperaturi ridicate (150-190°C)	Produse agresive pentru piele
Proprietăți mecanice bune (superioare celor ale rășinilor cu difuzie mare, cum ar fi poliesterul)	Praful din șlefuire este toxic

1.2.2 Utilizări ale materialelor polimerice termorigide

Datorită caracteristicilor tehnice și proprietăților mecanice pe care le posedă materialele polimerice termorigide sunt folosite tot mai frecvent în industria aeronautică, industria aerospațială, industria auto, industria energetică, industria navală etc.

Aspectele de sustenabilitate, legate de emisiile de noxe, reprezintă un beneficiu secundar important al rășinilor epoxidice prin reducerea masei structurale. Emisiile de noxe, și în special de CO₂, sunt vizate de autoritățile de reglementare și sunt tot mai restrictive. Astfel, autovehiculele electrice, precum și manufacturarea lor, vor crește exponențial cererea de materiale compozite, care să contrabalanseze greutatea pachetelor de baterii foarte grele, având drept rezultat scăderea emisiilor [25],[26].

Versatilitatea rășinilor epoxidice rezultă din capacitatea lor de a se compatibiliza, din punct de vedere chimic și fizic, cu o mare varietate de compuși [27], inclusiv poliamide, tioli, imidazoli [28] și, mai recent, lichide ionice [29].

1.2.3 Solicitări principale la care sunt supuse materialele polimerice termorigide

Solicitările la care sunt supuse materialele polimerice termorigide [30] au fost îndelung studiate pe materialele „convenționale” [31],[32]. O mare parte dintre aceste studii au fost și sunt efectuate, în domeniul încercărilor mecanice [33],[34], cu scopul de a stabili dacă materialele respective îndeplinesc condițiile de funcționare și exploatare, în cazul unui produs finit. Pe lângă aceste solicitări, mai sunt și solicitările la oboseală cumulate cu uzare, solicitări studiate în cadrul acestei teze.

1.2.3.1 Solicitări la oboseală

Practica inginerescă a arătat că piesele componente ale mașinilor și angrenajelor sunt supuse, în timp, unor sarcini variabile. Acest fapt are drept consecință ruperea respectivelor piese, cu toate că tensiunile maxime care acționează asupra acestora, sunt inferioare rezistenței la rupere sau chiar limitei de elasticitate a materialului. Fenomenul este denumit *oboseală*, caracteristicile mecanice respective – *limite de oboseală* sau rezistențe la oboseală, iar deteriorările sunt numite *ruperi prin oboseală* [35],[36].

Pentru metale, procesul de oboseală este, în general, bine înțeles, deoarece se știe că deplasările în metale se produc la nivelul structurii cristaline, iar cercetările în acest domeniu sunt într-un stadiu avansat. Din păcate, nu se poate spune același lucru despre oboseala materialelor polimerice, întrucât structura lor moleculară este complet diferită și, din această cauză, este foarte greu de obținut un tipar în procesul de inițiere a fisurilor. În teorie se poate afirma că din momentul inițierii unei fisuri, propagarea ulterioară a acesteia este similară metalelor [37].

Durata de viață a unei piese se apreciază, de obicei, prin numărul de cicluri efectuați până la rupere și este notată cu N . Determinarea duratei de viață se face prin supunerea unui lot de epruvete la solicitări ciclice, prima dintre ele, la o tensiune maximă mai mică decât rezistența la rupere a materialului R_m , urmând ca celelalte să fie încărcate cu o tensiune maximă mai mică decât precedentele. Transpunând într-un grafic valorile σ_{max} și N , se obține curba lui Wöbler, numită și curba de durabilitate la oboseală, asemănătoare cu cea prezentată în figura 1.1.

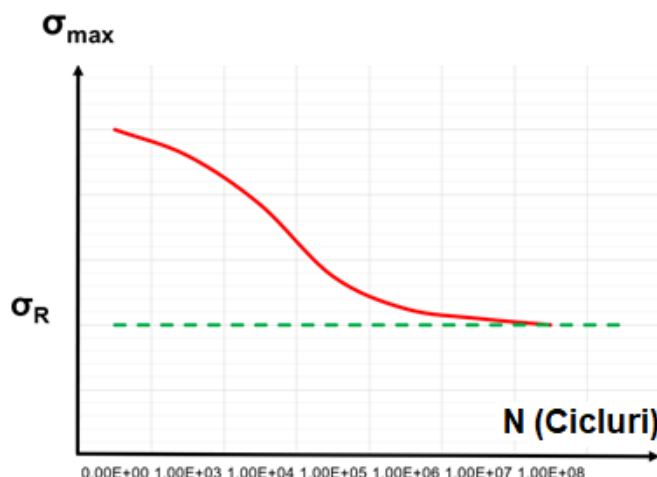


Figura 1. 1. Curba lui Wöbler specifică unor oțeluri. [38]

În cazul materialelor compozite polimerice armate cu fibre, studiul la oboseală este mai complex decât în cazul metalelor, din cauza faptului că distrugerea prin oboseală se produce în patru etape și anume: crăparea matricei, descompunerea interfațială, delaminarea și ruperea fibrelor [39]. Aceste concluzii sunt bazate pe efectuarea multor teste de investigare a oboselii, iar pe baza acestora au fost dezvoltate mai multe modele de distrugeri liniare și neliniare [40],[41],[42],[43],[44],[45].

Teste la oboseală efectuate pe un eșantion de materiale laminate, formate din nanocompozite compuse din epoxi/carbon și modificate cu nanofibre de nailon 66 [46], au

arătat că rata de formare a fisurilor a scăzut semnificativ, fapt care conduce la mărirea duratei de viață a nanocompozitelor luate în discuție.

1.2.3.2 Solicitări la uzare

Rezistența la uzare a unui material este la fel de importantă ca și proprietățile mecanice ale respectivului material. Uzarea este caracterizată printr-o pierdere de material de pe suprafața de contact a unei piese atunci când aceasta este supusă unei mișcări relative, în contact cu altă piesă [47].

În ceea ce privește materialele polimerice termoplastice, au fost identificate mai multe mecanisme de uzare, respectiv uzarea adezivă, uzarea abrazivă, oboseala suprafeței, uzarea chimică și uzarea termică [48],[49]. În cazul polimerilor termorigizi, cele mai discutate mecanisme de uzare sunt abraziunea și aderența.

Parametrii tribologici cei mai relevanți, și care sunt cel mai des utilizați în calculele uzurii, sunt rata de uzură și coeficientul de frecare [50]. Rata de uzură reprezintă pierderea de volum pe unitate de distanță și este independentă de sarcina aplicată, iar coeficientul de frecare este raportul dintre forța de rezistență la alunecare și forța de încărcare și determină cuplurile și sarcinile în contact.

Prin diferite tehnici de măsurare și analizare a parametrilor uzurii, se poate realiza o clasificare, și o evaluare a tribosistemelor în funcție de caracteristicile acestora de durabilitate și fiabilitate [51]. Din cauza faptului că uzura apare ca urmare a interacțiunii între două componente, parte a unui tribosistem, parametrii uzurii nu se raportează la un singur material, ci sunt întotdeauna raportați la cuplul de materiale, de fapt, la tot tribosistemul [52]. De regulă, complexitatea proceselor de uzare duce la imposibilitatea modelării parametrilor acesteia, ei putând fi însă determinați experimental.

1.2.3.3 Solicitări compuse - oboseală cu uzare

Uzarea și oboseala sunt factori care au o contribuție însemnată în deteriorarea și distrugerea sistemelor mecanice. Despre modul în care aceste fenomene acționează asupra materialelor metalice, literatura de specialitate oferă numeroase informații, aceste fenomene fiind studiate și cercetate în mod independent. Începând cu anii 1985-1986 un grup de cercetători din Belarus a început să studieze efectele deteriorărilor care apar în sistemele mecanice, ca urmare a acțiunii simultane uzare cu oboseală. Această știință, care este o subdisciplină a mecanicii, a fost numită „*Tribo-fatigue*” [53].

Tipuri de daune cauzate de oboseală cu uzare:

- *Oboseală-alunecare*
- *Oboseală-rulare*
- *Oboseală-fretting*
- *Oboseală-corozivă*
- *Oboseală-eroziune*
- *Oboseală-coroziune-eroziune*

Analiza caracteristicilor integrale de bază ale rezistenței la oboseală, adică curba oboselii, se bazează pe următoarele trei criterii [53]: deteriorare volumică; deteriorarea suprafeței; daune și distrugerii cauzate de uzare și oboseală.

Deteriorarea volumică

Conform modelului unui corp deformabil, supus unei solicitări de uzare cu oboseală, deteriorările apar atunci când sunt atinse limitele de rezistență, corespunzătoare celor două solicitări, atât individual cât și simultan, la un nivel periculos.

Deteriorarea suprafeței

Deteriorările suprafețelor au loc în timpul interacțiunii de contact între două corpuri solide presate printr-o sarcină de contact și aflate într-un proces de mișcare relativă unul față de celălalt. Aceste corpuri constituie o pereche de frecare.

Determinarea caracteristicilor daunelor și distrugerilor cauzate de oboseală cu uzare

Fenomenul specific de oboseală cu uzare apare atunci când cel puțin unul dintre membrii unei perechi de frecare suferă o deformare ciclică a volumului, astfel încât solicitările de contact, cât și solicitările din afara contactului sunt induse simultan în zona de frecare.

Majoritatea mașinilor și echipamentelor actuale au în componența lor sisteme mecanice cu ajutorul cărora pot fi transmise mișcări, forțe și momente.

Determinarea caracteristicilor daunelor și distrugerilor cauzate de oboseală cu uzare ale unor materiale sau chiar a unor structuri, se poate face și cu ajutorul unor software de analiză cu element finit [54]. Aceste programe fac posibilă proiectarea și testarea virtuală a unor elemente sau chiar a unor ansamble, astfel, economisindu-se timp, spațiu, materiale etc.

1.3 Concluzii parțiale

- Studiind literatura de specialitate în domeniul polimerilor se observă că există o multitudine de materiale de studiu (cărți, reviste, conferințe etc.) care descriu cercetări și experimente realizate în acest domeniu, confirmând astfel actualitatea, interesul crescut și potențialul de dezvoltare.
- Odată cu apariția polimerilor s-au dezvoltat noi materiale compozite, cu proprietăți îmbunătățite din punct de vedere mecanic, avantaje care le recomandă pentru utilizarea în toate ramurile industriale.
- Reciclarea polimerilor termorigizi este mult mai dificilă deoarece după polimerizare nu mai pot fi supuși prelucrării a doua oară și nici nu s-au găsit metode viabile pentru realizarea unor tehnologii care să permită re folosirea acestora, așa cum se întâmplă cu polimerii termoplastici.
- Materialele compozite polimerice li se pot „modela” proprietățile încă din faza de proiectare-preparare, astfel încât se pot obține o serie de avantaje precum: masă volumică mică; rezistență mare la tracțiune; coeficient de dilatare foarte mic; rezistență ridicată la șoc; durabilitate mare etc.
- Compozitele polimerice au o serie de dezavantaje, precum: cost ridicat; nu prezintă ductilitate; nu pot fi reconvertite ușor în materia primă din care acestea au fost generate; componentele anorganice ale materialelor compozite nu se pot reutiliza; inflamabilitate ridicată etc.
- În funcție de materialele utilizate, compozitele polimerice pot avea comportare asemănătoare, sau mai bună decât metalele. De exemplu, compozitele cu grafit au o rezistență crescută la uzare prin frecare (mai bună decât a bronzului).
- Pentru materialele compozite polimerice este dificil de realizat o modelare sau o simulare a parametrilor de uzare datorită complexității acestor procese.
- Reducerea semnificativă a coeficientului de frecare și a ratei de uzură se poate face prin adăugarea unui strat de acoperire pe compozitul polimeric astfel încât să ofere o caracteristică de auto-lubrifiere.
- Deși literatura de specialitate oferă o gamă largă de studii cu privire la determinarea oboselii cumulate cu uzare a materialelor metalice, în ceea ce privește materialele polimerice termorigide, există puține studii efectuate pentru determinarea limitei de oboseală, dar niciun studiu care să evidențieze efectele cumulate ale oboselii și uzurii asupra acestor materiale.

Capitolul 2

Metodologie pentru testarea materialelor polimerice pe bază de rășini epoxidice la solicitări compuse de oboseală cu uzare

În studiile efectuate în cadrul acestei teze, am analizat o serie de materiale polimerice, care au fost supuse la solicitări concomitente de oboseală cu uzare, pentru a determina felul în care uzarea influențează durata de viață a unui material. Au fost testate mai multe eșantioane de epruvetele, într-o primă fază la oboseală, după care au fost supuse și la oboseală cu uzare, provocată prin frecare cu alunecare.

2.1 Metode de investigare și determinare a oboselii

Capacitatea materialului de a se opune ruperii atunci când este supus unor tensiuni variabile în timp se numește *rezistență la oboseală*.

În comparație cu ruperile produse prin solicitări statice, rupura la oboseală are un aspect specific cu două zone: o zonă lucioasă și o zonă grăunțoasă cu cristale ascuțite rezultate dintr-o rupere casantă produsă brusc.

Studiind literatura de specialitate, se poate constata că cea mai utilizată metodă de determinare a oboselii materialelor pentru ciclul alternant simetric și pulsator este cea bazată pe analiza tensiunilor având ca element de bază trasarea curbei lui Wöhler.

Sosnovskiy L. A. a explicat în cartea sa [55], pornind de la exemple practice, cum este evaluată performanța unui sistem mecanic specific, care este expus în mod frecvent la deteriorare provocată de oboseală cu uzare (DOU).

O altă metodă de determinare a limitei la oboseală a fost folosită de Fabio Giudice și alții [56], care au încercat să definească parametrii de oboseală ai unui oțel comercial (C 45) în condiții de încărcare statică și ciclică $R=0$, folosind o metodă termografică și comparând rezultatele cu ale altor teste efectuate prin alte metode.

O altă abordare în identificarea cauzelor care conduc la distrugerea pieselor și subansamblelor produse din diverse materiale și supuse la solicitări ciclice variabile este prin metoda de detectare a microfisurilor din materialele respective, folosind emisiile acustice [57].

Într-un alt studiu, Solberg, K. și alții [58] au analizat comportamentul la oboseală al unor epruvete produse din Inconel 718 prelucrate mecanic, finisate și ulterior supuse unui tratament termic.

Laurent Gornet și alții [59] au testat limita la oboseală a unui material compozit cu matrice epoxidică armat cu fibre de carbon dispuse unidirecțional. Ei au utilizat o altă metodă de estimare a limitelor de oboseală, așa-numita metodă a „testelor de autoîncălzire”.

Aceeași metodă de determinare a limitei de oboseală, a fost utilizată de Catherine Peyrac și alții [60], supunând la teste de oboseală un material compozit format dintr-o matrice polimerică termoplastică (PA66) și armat cu țesătură din fibre de carbon.

Alte metode care sunt utilizate pentru determinarea oboselii materialelor încă din faza de proiectare a unor elemente și subansamble sunt cele care utilizează softuri dedicate de proiectare pe calculator (*CAD Computer-Aided Design*).

Utilizând programul CAD – SOLIDWORKS, am proiectat două planetare utilizate la autoutilitarele Dacia Pick-up, iar rezultatele au fost publicate în articolul *Re-Engineering of a planetary shaft based on life expectation* [61]. Scopul acestei cercetări a fost de a supune două tipuri diferite de planetare auto (una prevăzută cu o flanșă de prindere pe butucul roții, iar cealaltă cu caneluri, „tip tijă”) la diverse solicitări pentru a stabili durabilitatea acestora. Ideea de la care a pornit acest studiu a fost că prima planetară folosită la transmisia laterală a autoturismelor Dacia Pick-up, cea cu flanșă, a avut un inconvenient, motiv pentru care a fost înlocuită. După modelarea celor două tipuri de planetare în programul SolidWorks, la dimensiunile și formele reale, acestea au fost supuse unei simulări de analiză cu element finit. Simularea a constatat în supunerea acestora la forțe de încovoiere și momente de torsiune reale, de tip static, ciclic constante și ciclic variabile. Rezultatele au arătat că ambele tipuri de planetare au o durabilitate nelimitată, însă din punct de vedere masic, una avea masa mai redusă cu aproximativ 50% față de cealaltă.

Concluziile acestui studiu arată că ambele tipuri de planetare îndeplinesc condițiile teoretice de proiectare, de dimensionare și alegere a materialului de fabricare și, teoretic, au o durabilitate nelimitată. O altă concluzie a fost că planetara tip „tijă” are aproximativ jumătate din greutatea celeilalte planetare. De aici rezultă numeroase avantaje pentru folosirea planetarei mai ușoare, în primul rând financiar (greutate mică = volum și dimensiuni mici, prelucrare mai simplă = cost mai mic). Dacă planetara este mai mică, automat că și celelalte subansamble ale transmisiei (diferențial, butucul roții) au fost redimensionate micșorându-li-se greutatea, toate acestea ducând la reducerea greutății totale a autovehiculului și creșterea capacității de încărcare a acestuia.

Un alt studiu pe care l-am realizat pentru a determina durata de viață a unor materiale folosind un program CAD, a fost prezentat în cadrul conferinței internaționale IManEE 2018 și publicate în articolul *Fatigue life investigation on a MAC engine piston* [62]. Studiul a vizat investigarea influenței formei capului, precum și a materialelor din care sunt realizate pistoanele folosite la motoarele auto Diesel, precum și optimizarea acestora din punct de vedere al oboselii materialelor. Pentru realizarea acestor scopuri a fost utilizată metoda analizei cu element finit, care este parte integrantă a softului SolidWorks. În primul rând, au fost proiectate două pistoane, cu două forme diferite ale capului, unul având camera de ardere în centrul capului pistonului, iar al doilea având camera de ardere decalată față de axa verticală a acestuia. De asemenea, au fost utilizate două materiale diferite, respectiv aliaj de aluminiu și oțel aliat. Ulterior proiectării, aceste pistoane au fost supuse la simulări de oboseală și păstrate pentru comparație. Câte o copie a acestora, a fost supusă la simulări repetate de oboseală, iar după fiecare simulare s-au efectuat modificări dimensionale și, pe cât posibil de formă (fără a afecta caracteristicile de bază ale pistoanelor și dimensiunile impuse), până în momentul în care, analiza cu element finit a arătat că acestea nu mai corespund din punct de vedere al durabilității materialelor.

Concluziile au arătat că în urma supunerii la simulări de oboseală a celor patru pistoane, două confecționate din aliaj de aluminiu și două din oțel aliat, pistoanele din aluminiu au caracteristici asemănătoare (durata de viață și factorul minim de siguranță). În ceea ce privește pistoanele din oțel aliat, s-a observat că toți parametrii rezultați pentru pistonul căruia i-a fost optimizată forma, sunt mult îmbunătățiți și, ceea ce este mai important, masa acestuia s-a redus considerabil, cu aproximativ 40%.

Folosirea unui soft de proiectare are o multitudine de avantaje precum: programul oferă o interfață intuitivă, nu necesită mulți operatori, în orice stadiu al modelului se poate redimensiona un anumit segment sau chiar întreaga piesă, proiectarea și testarea pieselor încă din faza de desenare, existența unei biblioteci de unde se poate alege o gamă variată de materiale cu tot cu caracteristicile acestora, programul creează un raport detaliat care cuprinde toate informațiile despre piesa proiectată etc.

2.1.1 Dispozitive utilizate pentru încercări la oboseală

Testele de oboseală sunt efectuate pe materialele care, în timpul funcționării, sunt supuse unor tensiuni repetate, cu scopul de a determina reducerea rigidității, a rezistenței acestora și determinarea numărului total de cicluri de funcționare până la distrugere.

Pentru efectuarea testelor de oboseală, în funcție de tipul solicitărilor, sunt utilizate o gamă variată de standuri, unele având o construcție simplă, fiind dedicate doar acestui tip de testare și utilizate pentru realizarea testelor de laborator sau altele, cu o construcție mai complexă, care pot realiza o gamă diversificată de teste.

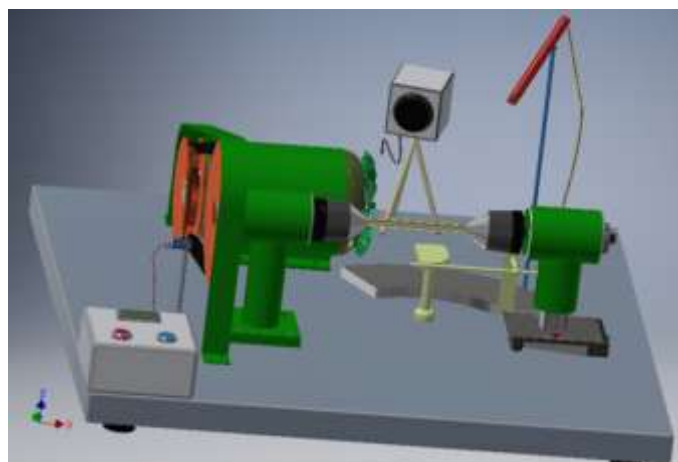
Pot fi amintite: standul Amsler 150 HFP 5100 produs și comercializat de firma ZWICK / ROELL [63], cel produs de firma ZWICK / ROEL, standul de testare la oboseală, dezvoltat și livrat de firma Amsler Prüfsysteme (Schweiz) AG, care este o companie a Grupului ZWICK / ROELL.[64], standul UBM 200tC, un stand de laborator utilizat pentru a determina rezistența la oboseală a unor epruvete metalice cu secțiune circulară, supuse la tensiuni alternative prin încovoieră rotativă conform DIN 50113, care reglementează acest gen de teste [64]. Mai poate fi amintit dispozitivul de testare a oboselei materialelor polimerice termorigide proiectat și realizat de către Gheorghe V. și Purcărea R [65]. Ujjwal Makkar și alții [66] au determinat curba lui Wöhler pentru două materiale compozite, primul material fiind format dintr-o rășină epoxidică, armată cu fibre de sticlă, iar al doilea material din rășină epoxidică și fibre de carbon. Pentru a realiza acest lucru, autorii studiului au folosit epruvete cu formă cilindrică, supuse la teste de oboseală prin încovoieră rotativă.

2.1.2 Soluție constructivă propusă

Pentru testarea la oboseală, în condiții de laborator, a unor epruvete cilindrice a fost creat un stand cu ajutorul căruia mai multe epruvete au fost supuse unor solicitări variabile de încovoieră rotativă, iar rezultatele obținute au fost folosite pentru a determina curba lui Wöhler, tensiune-număr de cicluri (S-N) specifică materialului testat.

Standul este compus dintr-o platformă metalică realizată din țevă rectangulară de 30x20x1,5 mm, are formă de pătrat cu latura de 550 mm, este acoperit cu tablă de 5 mm, se sprijină pe 4 picioare din cauciuc, iar înălțimea totală este de 50 mm. Pe platformă sunt dispuse celelalte părți componente care formează standul, respectiv: un panou de comandă, un motor electric, curea de transmisie prevăzută cu o apărătoare metalică, două mandrine, o suprafață de culisare a uneia dintre mandrine, scară gradată.

În figura 2.1 a este prezentată schița standului, având epruveta în stare de repaus, iar în figura 2.1 b este reprezentată schița standului, având epruveta înclinată la un unghi oarecare.



a)

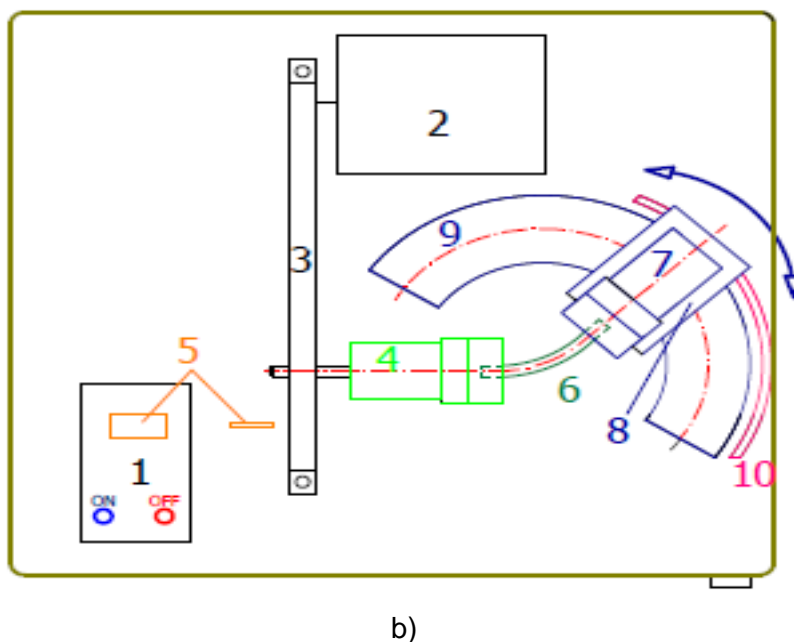


Figura 2. 1. Schița standului: a) cu epruveta în stare de repaus, b) cu epruveta înclinată. [67]

Principiul de funcționare al standului și modul de funcționare sunt realizate într-un mod care să permită efectuarea testelor de oboseală cu resurse financiare minime și o manipulare cât mai facilă. Punerea în funcțiune a dispozitivului se realizează prin rotirea butonului „ON” situat pe panoul de comandă (1), moment în care este alimentat motorul electric (2). Acesta, prin intermediul unei curele care este protejată de o carcasă (3), transmite mișcarea de rotație către axul pe care se află mandrina fixă (4), rotație care este înregistrată de către un dispozitiv prevăzut cu un magnet atașat de fulia axului, un contact electromagnetic și un ecran digital de afișate (5). Un capăt al epruvetei (6) este fixat în mandrina fixă, iar celălalt capăt în mandrina mobilă (7), mandrină care se rotește datorită epruvetei, iar în momentul în care aceasta se rupe mandrina mobilă se oprește. La rândul său, mandrina 7 este prinsă prin intermediul unui bolt, care îi asigură rotirea în jurul axei verticale pe suportul de culisare (8). Tensiunea în epruvetă este realizată prin îndoirea ei, lucrul acesta realizându-se prin deplasarea suportului 8, pe suprafața de culisare în formă de semicerc (9), iar gradul de înclinare este arătat pe scala gradată (10) [67].

Pentru a monitoriza temperatura mediului ambiant și a epruvetelor în timpul efectuării testelor, standul este prevăzut cu o cameră de termoviziune marca Optris PI 160 (figura 2.2 a), iar pentru observarea comportării epruvetelor la uzură, standul are în componența sa și o cameră de luat vederi marca Supereyes (figura 2.2 b). De asemenea, pentru observarea unor elemente în detaliu, s-a folosit un microscop digital al cărui obiectiv are posibilitatea reglării zoom-ului optic 1X-20X.



a)



b)

Figura 2. 2. Dispozitive de monitorizare: a) cameră de termoviziune, b) cameră video.

În figura 2.3 este prezentat standul cu toate modificările realizate, în vederea eliminării inconvenientelor constatate în timpul primelor teste.



Figura 2. 3. Stand de testare la oboseală.

1- panou de comandă; 2 – Motor electric; 3 – Carcasa curelei; 4 – Mandrină fixă; 5 – Dispozitiv de citire și afișare a rotațiilor; 6 – Epruvetă; 7 – Mandrină mobilă; 8, 9 – Dispozitiv de culisare a mandrinei mobile; 10 – Dispozitiv care facilitează concentrarea tensiunilor la jumătatea epruvetelor; 11- Cameră de termoviziune; 12 – Cameră video.

2.2 Metodologie de încercare la oboseală cu uzare

Uzarea apare ca urmare a interacțiunilor dintre suprafețele aflate în contact și se manifestă prin deformarea și îndepărtarea unei părți de material de pe una din suprafețe sau chiar din ambele.

Pentru realizarea testărilor simultane, uzare cu oboseală, au fost concepute și dezvoltate noi clase de echipamente de testare [68],[69],[70]. În figura 2.4 este exemplificat principiul după care s-au dezvoltat aceste standuri de testare și metodele prin care se pot realiza testele de uzare cu oboseală atunci când principala sursă de oboseală mecanică apare ca urmare a proceselor repetate și concomitente de îndoire și rotire, procese care se regăsesc aproape la toate mașinile și utilajele moderne [71],[72],[55].

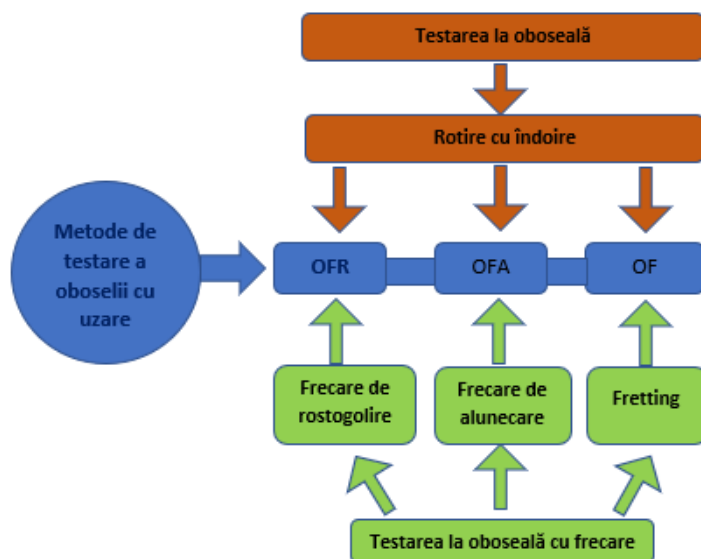


Figura 2. 4. Dezvoltarea metodelor de testare a obosealii cu uzare în timpul mișcării principale de rotație: OFR - oboseală cu frecare de rulare; OFA - oboseală cu frecare de alunecare; OF - oboseala la fretting [55],[70]

2.2.1 Standuri utilizate pentru încercări la solicitări compuse

La începutul anilor 1990, a fost proiectat un stand de testare numit „SI-OM” (după inițialele numelor celor care l-au realizat: Sosnovskiy și Indman), iar ulterior i-au fost aduse mai multe modificări pentru îmbunătățirea performanțelor acestuia.

2.2.2 Soluție constructivă propusă

În capitolele anterioare au fost arătate diverse metode, standuri și cercetări realizate atât în ceea ce privește oboseala, cât și uzura materialelor polimerice și a compozitelor pe bază de rășini polimerice.

Analizând literatura de specialitate se poate observa că nu sunt efectuate studii în ceea ce privește oboseala cu uzura a materialelor polimerice sau a compozitelor pe bază de rășini polimerice termorigide sau, mai bine spus, modul în care uzura afectează durata de viață a unor materialelor polimerice termorigide.

Pentru a realiza acest gen de teste, a fost atașat standului realizat pentru teste de oboseală, descris în subcapitolul 2.1.2, un dispozitiv (figura 2.5) prin care se realizează o frecare de alunecare pe suprafața epruvetei.

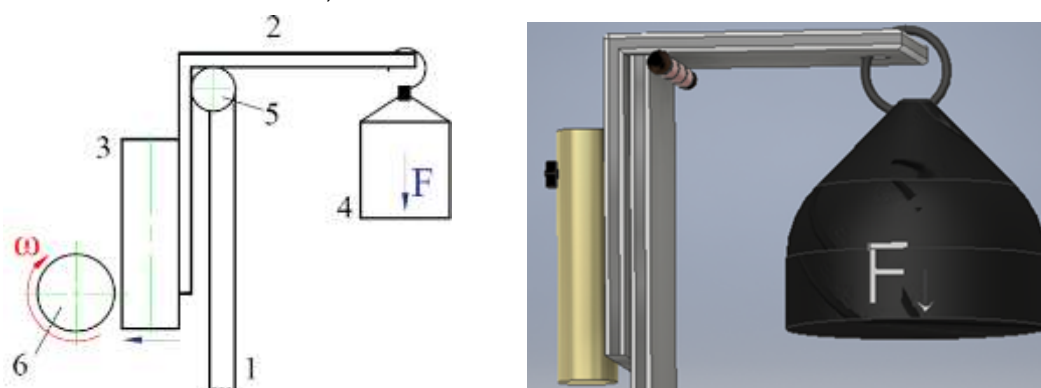


Figura 2. 5. Dispozitiv pentru realizarea uzurii prin frecare cu alunecare.

În figura 2.6 este prezentat standul care are atașat dispozitivul cu ajutorul căruia este realizată uzura prin frecare cu alunecare.



Figura 2. 6. Dispozitiv pentru realizarea uzurii.

Contrapiesă 3 poate fi realizată din diverse materiale, are secțiune circulară, diametrul de 6 mm și lungimea de 25 mm.

2.3 Materiale și procedee utilizate

2.3.1 Materiale supuse testării

Epruvetele, necesare acestui studiu, au fost realizate din rășină polimerică epoxidică Epiphen RE 4020 (prepolimer reactiv cu grupări epoxi, cu 75...78% bisfenol A), în amestec proporțional cu întăritorul recomandat de producător, DE 4020 (amine alifaticе modificate), iar în cazul materialelor compozite, matricea a fost realizată din această rășină, care este produsă de R&G Gmb Waldenbuch.

Materiale polimerice epoxidice aditivate

În cadrul acestor studii, pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice ale rășinii epoxidice utilizate s-au folosit aditivi sub formă de pulberi sau lichizi.

Aditiv pulbere aramidică

Pentru a crea un material compozit cu proprietăți mecanice îmbunătățite, s-a optat pentru aditivarea rășinii epoxidice Epiphen RE 4020 și întăritorul DE 4020 cu pulberi de aramidă, produsă de Dhingra Plastic & Plastiscisers Pvt. Ltd. Câteva caracteristici ale pulberii de aramidă sunt: rezistență ridicată la tracțiune, bune proprietăți de amortizare a șocurilor, rezistență mărită la oboseală, densitate scăzută și dilatație termică nulă [73], care ar trebui să îmbunătățească proprietățile mecanice și termice ale acesteia.

Aditiv ulei sintetic

În vederea realizării unui material compozit care să prezinte proprietăți mecanice îmbunătățite, atât la solicitări de oboseală, cât și la uzare, a fost introdus în rășina epoxidică Epiphen RE 4020 cu întăritor DE 4020, un aditiv pe bază de ulei sintetic, în diferite proporții, produs de TOTAL ROMANIA S.A.

2.3.2 Descrierea procedurii de obținere a epruvetelor

Procesul de formare a materialelor compozite cu matrice epoxidice trebuie să treacă prin mai multe etape: [74]

1. analiza proprietăților și a caracteristicilor rășinilor;
2. stabilirea metodei de dispersie;
3. stabilirea fracției;
4. stabilirea necesarului de epruvete;
5. stabilirea tipului de matrice;
6. finalizarea procesului;
7. selectarea epruvetelor.

În procesul de formare, matricea polimerică trece printre trei faze de transformare (figura 2.7): în prima fază, este un material fluid/lichid (starea inițială); în faza a doua se transformă într-un material sub formă de gel (perioada de polimerizare); în faza finală a procesului de polimerizare se transformă într-un material sticlos (stare finală). [75]



Figura 2. 7. Fazele de transformare a matricei polimerice. [75]

Polimerizare matricelor epoxidice este rapidă, se produce la temperatura ambiantă, fără degajare de produși secundari volatili.

Aplicarea tratamentului termic este o etapă importantă, deoarece această operațiune are rolul de a elimina tensiunile remanente apărute în volumul materialului format, conferindu-i acestuia o stare de echilibru, precum și de a-i îmbunătăți proprietățile mecanice și termice.

Timpul de amestecare a celor două componente (figura 2.8) a fost de 10 minute și s-a efectuat cu ajutorul unui mixer, la o turație de 60-70 rot/min (o turație mai mare ar introduce aer în compoziție). Acești parametri au fost stabiliți pe baza testelor efectuate anterior la diferite turații și timpi diferiți. După amestecare, nu s-a mai intervenit asupra mixturii timp de 15 minute, pentru a facilita eliminarea aerului. Ținând cont de faptul că timpul de manipulare a mixturii este de maximum 40 de minute din momentul începerii amestecului, procedura de turnare în matrițe trebuie să fie rapidă dar, pe cât posibil, fără a introduce aer în interior, deoarece forma și lungimea acesteia nu facilitează eliminarea bulelor de aer.



Figura 2. 8. Întăritor DE 4020 (A), Epiphen RE 4020 (B),

Epruvetele folosite în acest studiu au fost turnate în matrițe tubulare, au lungimea de 120 mm și un diametrul de 8 mm. Prinderea epruvetelor în mandrine s-a realizat pe o lungime de 20 mm, la ambele capete, astfel că lungimea de testare efectivă a fost de 80 mm.

Pentru realizarea unui compozit polimeric, trebuie să fie introdusă în rășina polimerică o anumită cantitate de material de aditivare (în proporții volumice sau masice). În cazul rășinilor epoxidice cu întăritor, aditivul poate fi dispersat într-una din cele două componente sau în amestecul pre-polimeric [76],[77].

2.4 Planificarea și efectuarea testelor

Cercetarea actuală urmărește determinarea influenței uzurii asupra obosealii unor materiale polimerice termorigide sau a unor compozite polimerice termorigide. În vederea realizării acestui scop, au fost supuse la teste de oboseală, ulterior la teste de oboseală cu uzare (provocată prin frecare cu alunecare), o serie de epruvete realizate din rășină epoxidică Epiphen RE 4020, cu întăritor DE 4020, precum și a unor epruvete obținute prin aditivarea acestei rășini, cu aditivi sub formă de pulberi sau lichizi, fiind supuse testelor, câte cinci epruvete din fiecare eșantion, pentru fiecare grad de îndoire a epruvetelor.

Au fost create peste 1000 de epruvete, mare parte dintre acestea fiind utilizate pentru testele efective de oboseală și oboseală cu uzare.

Testele s-au derulat pe parcursul a 17-18 luni, ținând cont că la o înclinare a mandrinei mobile de 8 grade, durata unui singur test este de aproximativ 22 de ore.

Determinarea etalonului și a influenței metodei de polimerizare

În vederea efectuării acestor studii, în primul rând, s-au creat o serie de epruvete doar din rășină epoxidică Epiphen RE 4020, cu întăritor DE 4020. Aceste epruvete au fost supuse

la teste de oboseală, efectuate respectând aceleași condiții de temperatură, între 24° C și 25° C.

Pentru a determina dacă metoda de polimerizare are o influență semnificativă asupra solicitărilor de oboseală, au fost aplicate trei scheme de polimerizare, dintre care cele supuse tratamentului termic în trei etape sunt net superioare celor polimerizate natural la temperatura camerei, sau a celor cărora le-a fost aplicată schema tratamentului termic într-o singură etapă.

Așadar, rezultatele obținute pentru epruvetele tratate termic în trei etape au fost utilizate ca etalon în vederea comparării rezultatelor testelor ulterioare de oboseală precum și a celor de oboseală cu uzare.

Determinarea influenței aditivilor

Pentru obținerea unor materiale compozite cu proprietăți îmbunătățite la solicitări de oboseală și la cele cumulate oboseală cu uzare s-au utilizat două tipuri de aditivi, primul fiind pulberea de aramidă, iar al doilea un ulei sintetic.

În cadrul studiului, au fost create mai multe epruvete, confecționate din rășină epoxidică Epiphen RE 4020, cu întăritorul DE 4020 și aditivate cu pulberi de aramidă în diferite proporții masice (4%, 3% și 2,5%, cele din urmă având rezultate concludente), care au fost supuse unor metode diferite de polimerizare.

Un alt material compozit supus testelor, a fost format din rășină epoxidică Epiphen RE 4020 cu întăritorul DE 4020, aditivată cu ulei sintetic. Din testele preliminare s-a constatat că cea mai bună performanță la oboseală a fost obținută atunci când cantitatea de aditiv adăugată, a fost în proporție de 3%. (s-au inserat cantități masice de ulei de: 5%, 4%, 3%).

Determinarea influenței uzurii asupra oboselii

Toate materialele utilizate în cadrul acestui studiu au fost supuse, în primul rând, la solicitări de oboseală, după care au fost supuse la teste de oboseală cu uzare, cu scopul de a determina în ce proporție, sau dacă, uzura influențează rezistența la oboseală a materialului respectiv.

Testele de oboseală cu uzare au fost efectuate în cadrul a două cuple de frecare cu alunecare: o cuplă polimer-polimer (figura 2.9 a) și o cuplă polimer-metal (figura 2.9 b) și au fost efectuate cu forța normală de 5N (forță la care rezultatele au fost concludente), respectând aceleași condiții de temperatură (24°C - 25°C.).



a)



b)

Figura 2. 9 Contrapiese de frecare a) din polimer b) din oțel.

2.5 Concluzii parțiale

- Testarea la oboseală a materialelor polimerice epoxidice este utilă deoarece se poate anticipa durata de viață a unui produs realizat din materialul respectiv.
- Standul realizat pentru efectuarea testelor la oboseală, folosind metoda supunerii epruvetelor la solicitări de încovoieri rotative, este compact, oferă o manevrabilitate ușoară și are dimensiuni mai mici, în comparație cu standurile care folosesc greutatea pentru a induce solicitarea de oboseală.
- Viteza de rotire a epruvetei trebuie adaptată în așa fel încât să se evite autoîncălzirea materialului datorită tensiunilor interne formate.
- Implementarea unui dispozitiv realizat dintr-o tijă, o camă și un arc, a făcut posibilă concentrarea tensiunilor la jumătatea epruvetelor,

- Realizarea unor tăieturi fine, cu un dispozitiv de tăiere, are scopul de a concentra tensiunile la mijlocul lungimii epruvetelor, atunci când unghiul de înclinare este mai mare de 15 grade.
- Ca urmare a îmbunătățirilor aduse, standul realizat poate fi considerat adecvat pentru efectuarea testelor de oboseală și cumulate - oboseală cu uzare, asupra materialelor epoxidice.
- Materialele utilizate pentru aditivarea rășinii epoxidice (pulberea de aramidă, uleiul sintetic) au interacționat favorabil cu aceasta, datorită dozajului optim și a modului de amestecare,
- În urma testelor preliminare, s-a putut elabora un etalon, care a fost utilizat ulterior pentru compararea celorlalte rezultate,
- În urma testelor preliminare, au fost determinate atât cantitățile optime de aditivi care au fost introduse în rășina epoxidică, cât și forța maximă de apăsare a contrapiesei de frecare.

Capitolul 3

Rezultate obținute

3.1 Încercări la oboseală

3.1.1 Influența metodei de polimerizare asupra rezistenței la oboseală

Primele teste au fost efectuate pentru a determina în ce măsură este influențată rezistența la oboseală, atunci când sunt aplicate metode diferite de polimerizare. În acest scop, au fost utilizate două seturi de epruvete realizate din rășină epoxidică simplă (Epiphen RE 4020 cu întăritorul DE 4020) și preparate în condiții asemănătoare, dar polimerizate cu metode diferite. Pentru primul set, s-a aplicat metoda de polimerizare naturală, notată în continuare RNP (procesul de polimerizare s-a efectuat la temperatura incintei de lucru, 22-23° C), iar timpul de la turnare până la data în care au fost supuse testului de oboseală a fost de 60 de zile. Cel de-al doilea set, după polimerizarea la temperatura camerei, a fost supus unui tratament termic în trei etape, iar testarea la oboseală s-a făcut după 21 de zile de la aplicarea tratamentului termic (notat în continuare RTT).

Metodele utilizate, datele obținute și concluziile elaborate în cadrul acestui subcapitol, intitulat: Influența metodei de polimerizare asupra rezistenței la oboseală, au fost prezentate în cadrul conferinței internaționale SGEM 2020 în articolul „*Reduction of polymeric waste by applying heat treatments during the polymerization period*” [67] și publicate în volumul conferinței.

O primă observație, după turnare și înainte de începerea testării, a fost aceea că epruvetele supuse la tratament termic aveau o nuanță mai închisă la culoare, față de cele polimerizate natural (figura 3.1).

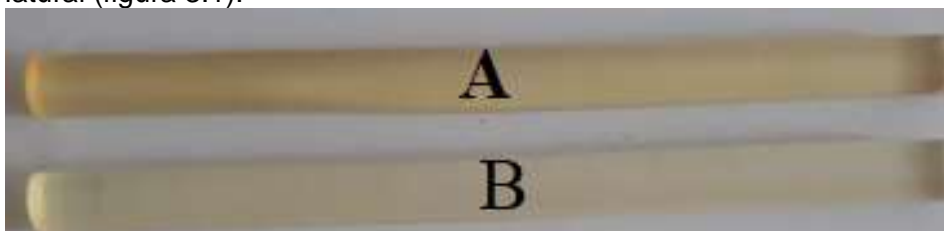


Figura 3. 1. Epruvetă RTT (A), epruvetă RNP (B).

Cu ajutorul camerei de termoviziune, s-a monitorizat evoluția temperaturii epruvetei supuse la solicitarea de oboseală. Monitorizarea temperaturii în timpul testelor este importantă, deoarece materialele polimerice termorigide se autoîncălzesc din cauza frecărilor interne care apar în urma solicitărilor la care acestea sunt supuse [78].

Un aspect, constatat în timpul testelor de oboseală ale epruvetelor RTT, este acela că la un unghi de înclinare a mandrinei mobile mai mare de 15-16 grade, rupura are forma unei așchii, vizibile în figura 3.2, semn că tensiunea este mare și ruperea se produce brusc.



Figura 3. 2. Forma rupturii epruvetelor RTT, îndoite la peste 15-16 grade.

Pentru a determina curba lui Wöhler, au fost supuse testării o serie de epruvete pentru fiecare unghi de înclinare. Unghiurile la care au fost înclinate probele precum și valorile medii rotunjite ale numărului de cicluri rezultați sunt prezentate în tabelul 3.1.

Tabelul 3. 1. Media rezultatelor obținute în urma efectuării testului la oboseală.

Unghiul de înclinare (°)	RNP (cicluri)	RTT (cicluri)	σ_{\max} (MPa)
8	96000	1250000	35.8
10	37000	132000	47.7
11	22000	75000	57.3
12	19500	29000	59.7
13	8000	25500	63.2
14	5500	15500	65.6
15	4100	12000	69.2
16	3000	9500	74.1
17	2200	6500	77.6
18	1700	4700	78.8
19	1200	2900	87.2
20	650	1500	90.7

Nu s-au efectuat teste sub unghiul de 8 grade deoarece epruvetele tratate termic au trecut de 10^6 cicluri, iar acest lucru se consideră acceptabil pentru materialele polimerice [79], [80].

Determinarea tensiunii transversale maxime σ_{\max} a fost posibilă cunoscând forța aplicată pentru îndoirea epruvetelor, iar rezultatele sunt prezentate în tabelul 3.1 și sunt exprimate în MPa.

Pe baza rezultatelor obținute și a datelor din tabelul 3.1, a fost trasată Curba lui Wöhler, tensiune - număr de cicluri (S-N), pentru cele două tipuri de epruvete supuse la testul de oboseală.

În figura 3.3 sunt reprezentate curbele S-N pentru epruvetele RNP și RTT.

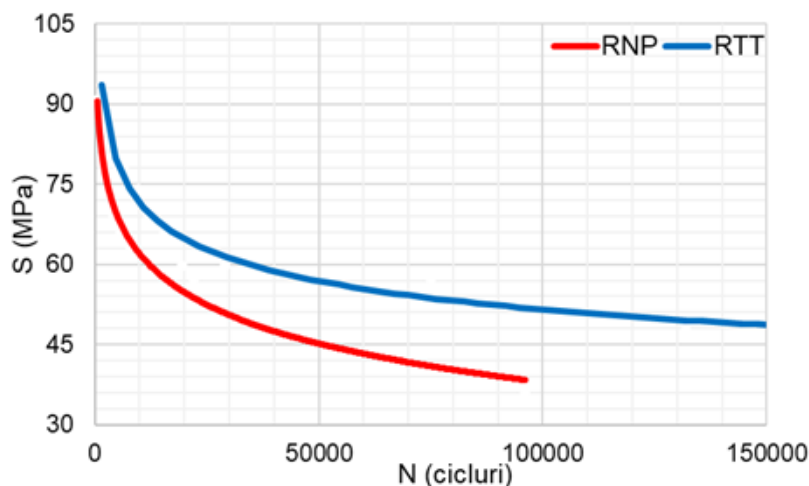


Figura 3. 3. Curbele lui Wöhler pentru epruvetele RNP și RTT.

3.1.2 Influența aditivilor asupra rezistenței la oboseală

Aditivi pulbere aramidică

Pulbere aramidică în proporție masică de 4 %.

Metodele utilizate, datele obținute și concluziile acestor teste, au fost publicate în articolul „Fatigue Polymeric Materials - Air Pollution Factor” [81], articol prezentat în cadrul unei conferințe și publicat în volumul acesteia. Studiul a pornit de la faptul că industria materialelor polimerice a cunoscut o mare creștere datorită avantajelor pe care acestea le prezintă, dar dacă aceste materiale nu sunt reciclabile sau reciclate, pot produce daune foarte mari mediului înconjurător. Așadar, articolul a abordat reducerea poluării cauzate de aceste materiale, prin studii de laborator, în urma cărora să se găsească mai multe posibilități de mărire a duratei de viață a pieselor și subansamblelor confecționate din materiale epoxidice, în așa fel încât distrugerea cauzată de oboseală să se producă cât mai târziu posibil.

Modul de preparare al epruvetelor este asemănător cu cel descris în subcapitolul 2.3, cu mențiunea că a fost adăugată pulberea de aramidă, în proporție masică de 4 %, după ce au fost amestecate rășina epoxidică și întăritorul timp de 10 minute (în continuare fiind notată cu RA 4%). Ulterior polimerizării naturale, epruvetele au fost supuse unui tratament termic de 8 ore, la temperatura de 60° C [82].

În tabelul 3.2 sunt prezentate rezultatele obținute în urma testării la oboseală a celor două tipuri de epruvete, precum și tensiunile maxime, în funcție de unghiul de înclinare.

Tabelul 3. 2. Media rezultatelor obținute pentru RP și RA 4%.

Unghiul de înclinare (°)	RP (cicluri)	RA 4% (cicluri)	σ_{max} (MPa)
15	2500000	650000	47,694
16	1250000	293000	48,887
17	850000	150000	51,271
18	250000	43000	56,836
20	31000	11600	62,639

Din datele prezentate în tabelul 3.2 se observă că epruvetele RP au în medie o durată de viață mai mare decât cele RA 4%, cu aproximativ 23,5%. Datele obținute și prezentate în tabelul 3.2 au fost utilizate pentru trasarea curbelor S-N, pentru cele două tipuri de epruvete, curbe vizibile în figura 3.4.

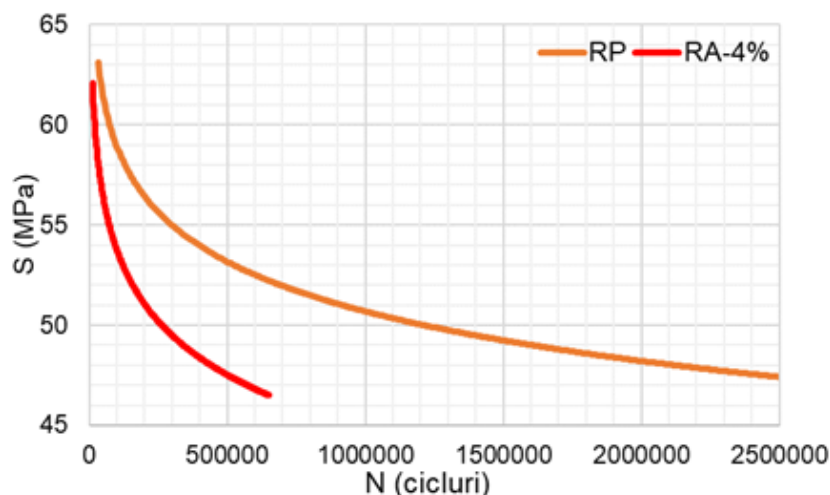


Figura 3. 4. Curbele lui Wöhler pentru RP și RA 4 %.

Pulbere aramidică în proporție masică de 2,5 %.

Un alt experiment efectuat în cadrul tezei, a constat în obținerea unui material compozit având ca matrice rășina epoxidică Epiphen RE 4020, cu întăritorul DE 4020, aditivat cu pulbere de aramidă. Spre deosebire de epruvetele RA 4%, pentru cele noi create s-a folosit schema de polimerizare în trei etape deoarece, după cum s-a constatat din testele anterioare (RTT și RA 4%), această schemă a condus la creșterea rezistenței la oboseală.

Pentru realizarea acestui obiectiv au fost create mai multe epruvete, cu proporții masice ale pulberii de aramidă diferite: 5%, 4%, 3% și 2,5 %. Întrucât testele preliminare realizate pe eșantioanele cu 5%, 4 % și 3% au avut rezultate neliniare, următoarele studii au fost realizate pe eșantionul aditivat cu 2,5 % pulbere de aramidă, numit în continuare RA 2,5%.

Mediile rezultatelor obținute sunt prezentate în tabelul 3.3.

Tabelul 3. 3. Media rezultatelor obținute în urma efectuării testului la oboseală pentru RA 2,5%.

Unghiul de înclinare (°)	RA 2,5% (cicluri)	σ_{\max} (MPa)
8	1110000	35,8
10	121800	47,7
11	69700	57,3
12	25400	59,7
13	22800	63,2
14	14300	65,6
15	8300	69,2
16	6000	74,1
17	4600	77,6
18	3300	78,8
19	2100	87,2
20	780	90,7

În figura 3.5 sunt prezentate curbele lui Wöhler pentru materialul compozit obținut din rășină epoxidică Epiphen RE 4020 cu întăritorul DE 4020, aditivat cu 2,5 % pulbere de aramidă (RA 2,5 %) și RTT.

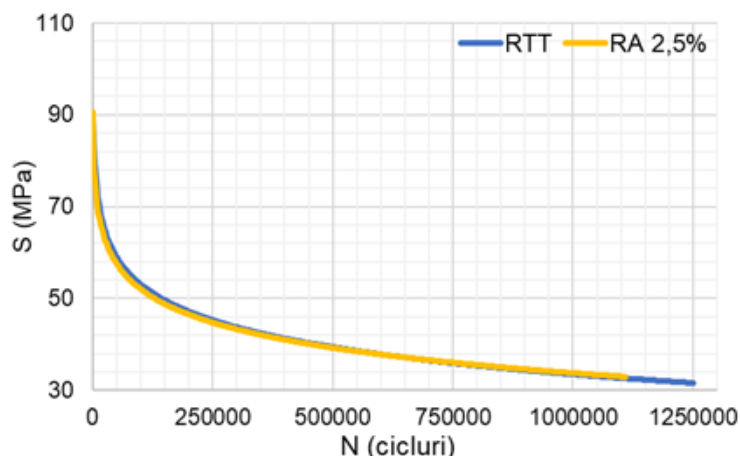


Figura 3.5. Curbele lui Wöhler pentru RTT și RA 2,5%.

Analizând graficul din figura 3.5 se observă că, din punct de vedere al obosealii, ambele tipuri de epruvete urmează aceeași curbă S-N, nefiind diferențe majore între RTT și RA 2,5%.

Un aspect observat la epruvetele care au în componență 2,5% pulberi de aramidă, a fost acela că temperaturile acumulate în timpul solicitării de oboseală prin încovoiere rotativă se acumulează local, disiparea acestor temperaturi în toată masa epruvetelor efectuându-se lent.

În figura 3.6 este prezentată o epruvetă RA 2,5%, înclinată la un unghi de 15 grade, iar din graficul de temperatură plasat deasupra epruvetei se poate observa distribuția temperaturii în masa acesteia, cea mai ridicată temperatură înregistrându-se la mijlocul epruvetei, unde solicitarea este maximă.

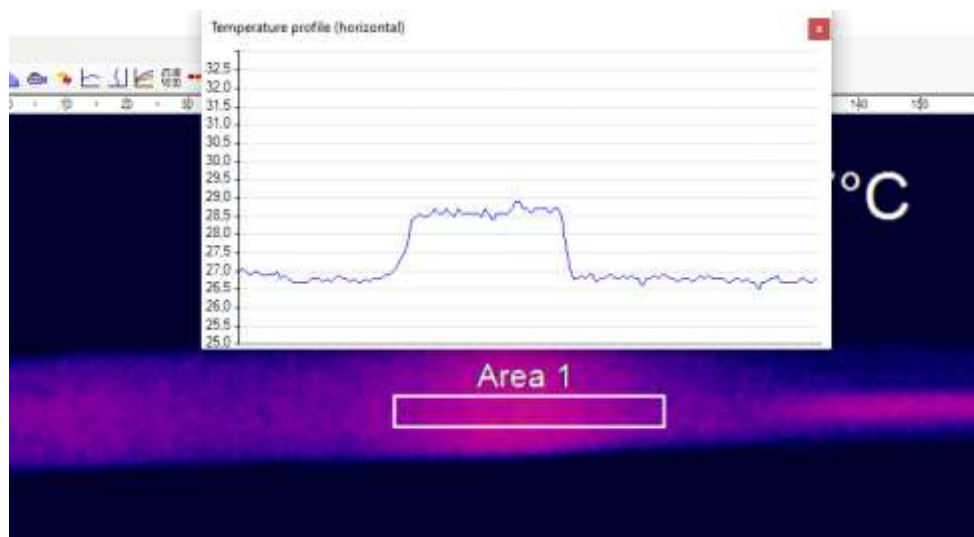


Figura 3. 6. Distribuția temperaturii în masa epruvetei RA 2,5%.

Aditiv ulei sintetic

În vederea obținerii unui material compozit cu proprietăți mecanice îmbunătățite, matricea formată din rășină epoxidică Epiphen RE 4020, cu întăritorul DE 4020, a fost aditivată cu ulei sintetic cu proprietățile descrise în subcapitolul 2.3. Amestecul prepolimeric a fost mixat timp de 10 minute cu ajutorul mixerului mecanic, după care s-a adăugat uleiul sintetic în proporție masică de 3 %, apoi s-a continuat mixarea încă 10 minute. În continuare, aceste epruvete vor fi notate RU 3%.

Mediile rezultatelor acestor teste, rotunjite la ordinul sutelor, sunt prezentate în tabelul 3.4.

Tabelul 3. 4. Media rezultatelor obținute în urma efectuării testului la oboseală pentru RU 3%.

Unghiul de înclinare (°)	RU 3% (cicluri)	σ_{\max} (MPa)
8	1250000	35,8
10	325400	47,7
11	113700	57,3
12	78000	59,7
13	48100	63,2
14	21100	65,6
15	12000	69,2
16	6900	74,1
17	4600	77,6
18	3400	78,8
19	2300	87,2
20	1100	90,7

Trebuie menționat faptul că epruvetele înclinate la un unghi de 8 grade au fost oprite de la testare, atunci când numărul de cicluri a atins valoarea maximă rezultată în urma testărilor epruvetelor RTT, respectiv 1.250.000 de cicluri. S-a optat pentru această variantă cu scopul de a reduce timpii de testare, întrucât pentru a ajunge la această valoare, unui singur test îi sunt necesare aproximativ 22 de ore.

În figura 3.7 sunt prezentate curbele lui Wöhler pentru materialele RTT și RU 3%.

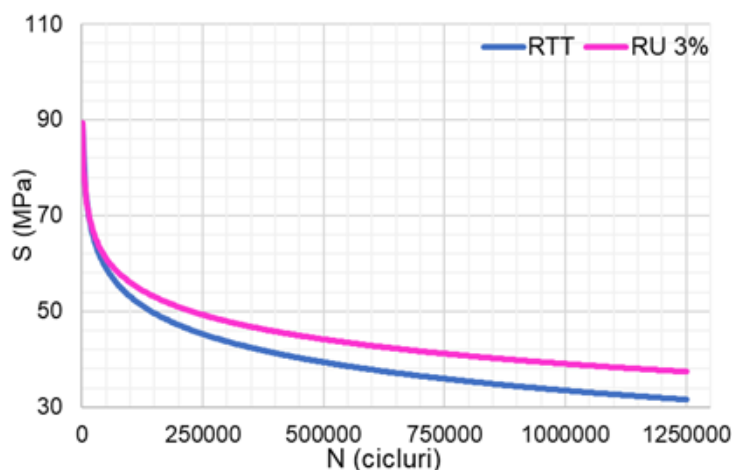


Figura 3. 7. Curbele lui Wöhler pentru RTT și RU 3%.

În figura 3.8 sunt prezentate curbele S-N pentru epruvetele RTT, RA 2,5% și RU 3%, unde se observă că, din punctul de vedere al obosealii, toate epruvetele depășesc 10^6 cicluri, dar RU 3 % pot suporta tensiuni mai mari la același număr de cicluri.

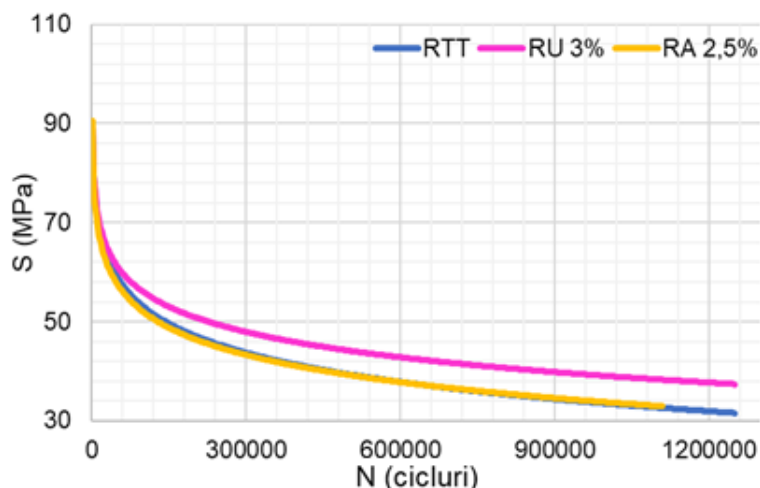


Figura 3. 8. Comparație între epruvetele RTT, RU 3% și RA 2,5%.

3.2 Încercări la oboseală cu uzare

Analizând literatura de specialitate se constată că au fost realizate studii referitoare la influența forței normale asupra frecării materialelor polimerice [83],[84],[73],[85] sau a modului în care frecarea este influențată de viteza de alunecare [86],[87],[73], precum și influența temperaturii asupra frecării [88],[89],[73],[90]. Însă, nu sunt cunoscute studii care să arate modul în care frecarea, respectiv uzarea, influențează oboseala materialelor polimerice sau dacă cele două solicitări acționează simultan asupra unui material polimeric și influențează durata de viață a acestuia.

3.2.1 Cuple polimer-polimer

Cuplele polimer-polimer sunt utilizate, de cele mai multe ori, în mecanisme unde vitezele și forțele de frecare sunt relativ mici. Cu toate acestea, în literatura de specialitate sunt puține studii efectuate cu privire la uzura provocată de frecarea între doi polimeri și puține cunoștințe în ceea ce privește comportarea tribologică a acestora [91],[92].

Materiale neaditivate

O serie de epruvete realizate din rășină epoxidică Epyphen RE 4020, cu întăritor DE 4020 și supuse la tratament termic în trei etape (RTT), au fost testate la oboseală cu uzare (provocată prin frecare cu alunecare într-o cuplă polimer-polimer).

Pinul (contrapiesa) care intră în contact cu epruveta prin frecare cu alunecare, în cupla polimer-polimer, are diametrul de 6 mm, lungimea de 25 mm.

În cadrul testelor de oboseală cu uzare s-a pornit cu o forță de apăsare a pinului pe suprafața epruvetei de 10 N, dar epruvetele s-au deteriorat ca urmare a încălzirii locale, peste limita de tranziție sticloasă (T_g).

În consecință, următoarele teste au fost efectuate cu o forță de apăsare a pinului pe epruvetă de 5 N, iar în cazul cuplei polimer-polimer vor fi numite în continuare RS-5cpp.

Rezultatele obținute în urma testelor de oboseală cu uzare a RS-5cpp sunt prezentate în tabelul 3.5.

Tabelul 3. 5. Media rezultatelor obținute în urma efectuării testului la oboseală cu uzare pentru epruvetele RS-5cpp.

Unghiul de înclinare (°)	RS-5cpp (cicluri)	σ_{\max} (MPa)
8	34300	35,8
10	21100	47,7
11	13700	57,3
12	9100	59,7
13	7100	63,2
14	5800	65,6
15	5000	69,2
16	4400	74,1
17	3800	77,6
18	2800	78,8
19	2100	87,2
20	1500	90,7

În figura 3.9 este prezentată imaginea microscopică a uzurii apărute pe o contrapiesă aflată în contact cu alunecare pe o epruvetă îndoită cu 11 grade.



Figura 3. 9. Uzura apărută pe contrapiesă.

Analizând datele din tabelul 3.5 sau curbele S-N din figura 3.10 (unde axa longitudinală a fost limitată la valoarea de 50.000 de cicluri pentru a evidenția mai clar deosebirea) se observă că durata de viață a epruvetelor RS-5cpp este cu mult mai mică decât în cazul RTT, atât din punct de vedere al obosealii, cât și din punct de vedere al tensiunii de rupere.

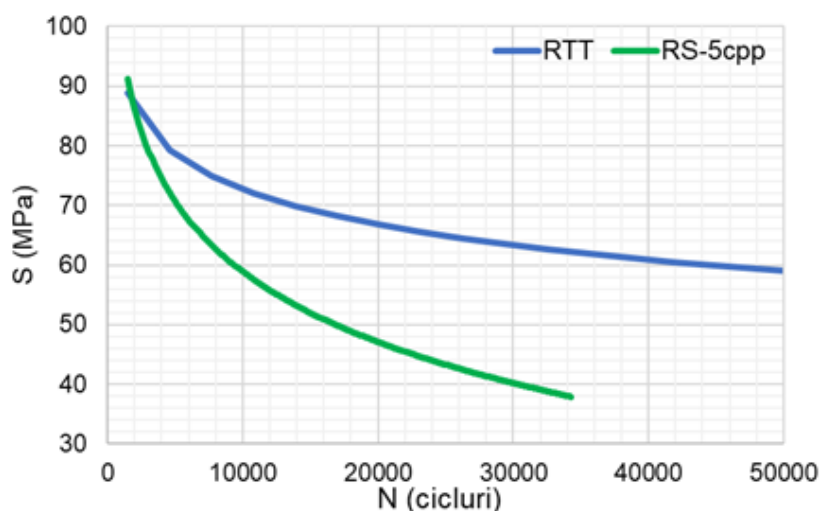


Figura 3. 10. Comparație între curbele S-N ale epruvetelor RTT și RS-5cpp.

Materiale aditivate cu 2,5% pulberi de aramidă

Epruvetele aditivate cu 2,5% pulberi de aramidă au fost supuse la teste de oboseală cu uzare într-o cuplă polimer-polimer (numite în continuare RA2,5-5cpp), în aceleași condiții de temperatură și utilizând același tip de contrapiesă.

Ca și în cazul epruvetelor RS-5cpp și epruvetele RA2,5-5cpp au fost supuse la teste de oboseală cu uzare provocată prin frecare cu alunecare, unde forța normală a pornit de la 10 N, dar în urma testelor preliminare s-a constatat că acestea se rup datorită atingerii temperaturii T_g . În consecință s-au continuat testele cu forța normală de 5 N.

Media rezultatelor obținute în urma testelor la oboseală cu uzare a epruvetelor RA2,5-5cpp este prezentată în tabelul 3.6.

Tabelul 3. 6. Media rezultatelor obținute în urma efectuării testului la oboseală cu uzare pentru epruvetele RA2,5-5cpp.

Unghiul de înclinare (°)	RA2,5-5cpp (cicluri)	σ_{max} (MPa)
8	171400	35,8
10	55200	47,7
11	31100	57,3
12	23300	59,7
13	17200	63,2
14	11400	65,6
15	8200	69,2
16	6500	74,1
17	4400	77,6
18	2700	78,8
19	1600	87,2
20	450	90,7

Pentru a observa diferențele dintre curbele de oboseală S-N ale epruvetelor RA 2,5% și RA2,5-5cpp, au fost suprapuse într-un grafic vizibil în figura 3.11.

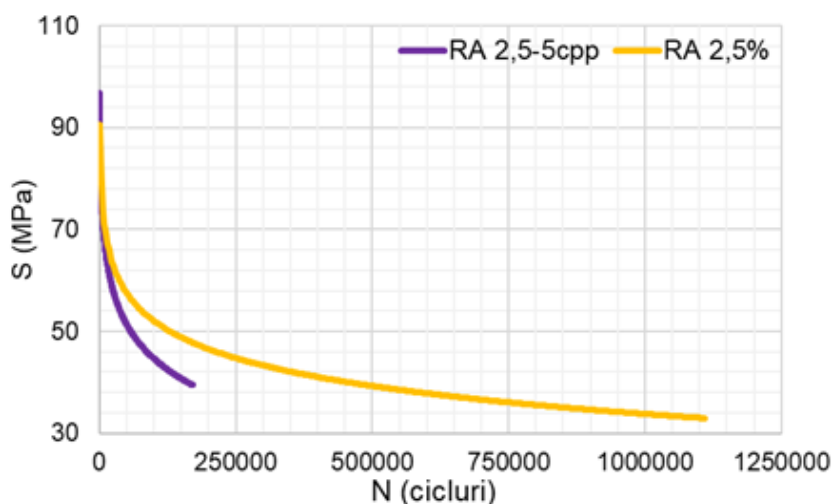


Figura 3. 11. Diferențele dintre curbele S-N ale epruvetelor RA 2,5% și RA2,5-5cpp.

Materiale aditivate cu 3% ulei sintetic

Un eșantion de epruvete RU 3% a fost supus testelor de oboseală cu uzare pentru a determina dacă și în ce procent, uzura provocată prin frecare cu alunecare într-o cuplă polimer-polimer afectează durata de viață a respectivului material.

Aceste teste au fost efectuate respectând aceleași condiții de temperatură și de apăsare a contrapiesei pe epruvete descrise în cadrul testelor epruvetelor RS-5cpp. Epruvetele polimerice epoxidice aditivate cu un procent de 3% ulei sintetic folosite la testele cu forță normală de 5 N vor fi numite în continuare RU3-5cpp.

Media rezultatelor obținute, ca urmare a testărilor la oboseală cu uzare a epruvetelor RU3-5cpp, sunt vizibile în tabelul 3.7.

Tabelul 3. 7. Media rezultatelor obținute în urma efectuării testului la oboseală cu uzare pentru epruvetele RU3-5cpp.

Unghiul de înclinare (°)	RU3-5cpp (cicluri)	σ_{max} (MPa)
8	189000	35,8
10	109100	47,7
11	27800	57,3
12	17600	59,7
13	12500	63,2
14	9700	65,6
15	7100	69,2
16	5100	74,1
17	3600	77,6
18	2900	78,8
19	1700	87,2
20	950	90,7

Un aspect remarcant în cadrul acestor teste este faptul că atât contrapiesele, cât și epruvetele nu au suferit uzuri cu deteriorarea suprafețelor, precum în cazul contrapieselor care au intrat în contact cu epruvetele RS-5cpp sau RA2,5-5cpp.

În figura 3.12 sunt prezentate curbele S-N ale materialului compozit realizat din rășină polimerică epoxidică aditivată cu 3% ulei sintetic supus testelor de oboseală (RU 3%) și oboseală cu uzare într-o cuplă polimer-polimer (RU3-5cpp), precum și ale epruvetelor RTT.

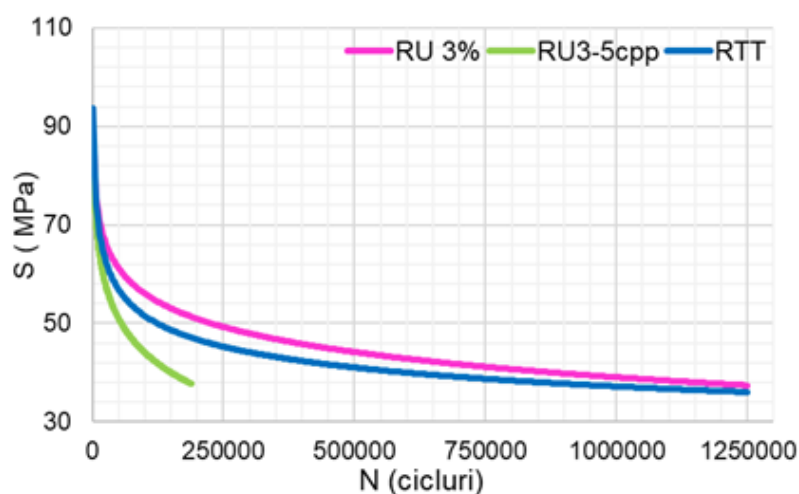


Figura 3. 12. Compararea curbelor S-N pentru epruvetele RU 3% și RU3-5cpp.

În figura 3.13 sunt prezentate spre comparație curbele S-N ale epruvetelor RS-5cpp, RA2,5-5cpp și RU3-5cpp.

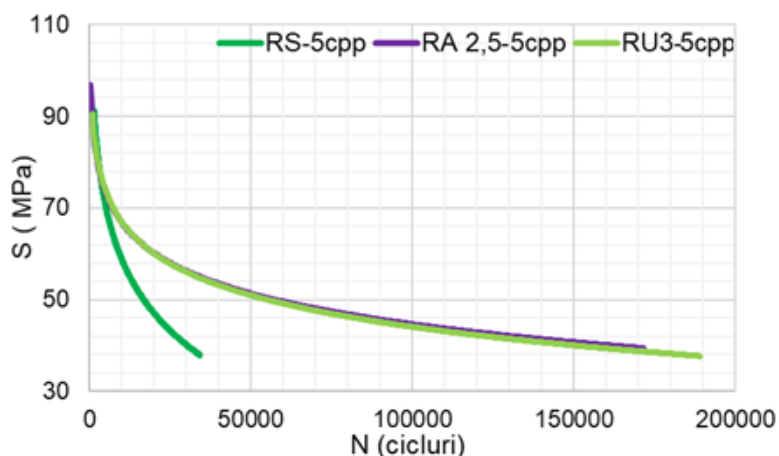


Figura 3. 13. Comparație între curbele S-N ale epruvetelor RS-5cpp, RA2,5-5cpp și RU3-5cpp.

Analizând graficul din figura 3.13 se observă faptul că, în urma testării la oboseală cu uzare, provocată prin frecare cu alunecare într-o cuplă polimer-polimer, cu forța de apăsare a contrapiesei de 5N, epruvetele realizate din rășină epoxidică Epyphen RE 4020 cu întăritor DE 4020 cărora li s-a aplicat un tratament termic în trei etape (RS-5cpp), au o durată de viață foarte mică, în comparație cu epruvetele RA2,5-5cpp și RU3-5cpp, care au curbele de oboseală aproape identice, cele din urmă având durata de viață cea mai mare.

3.2.2 Cuple polimer-metal

Materiale neaditivate

Un eșantion de epruvete RTT au fost supuse testelor de uzare cu oboseală într-o cuplă polimer-metal, în care forța normală a contrapiesei metalice a fost de 5N, numite în continuare epruvete RS-5cpm. În cadrul acestor teste, s-au respectat condițiile de temperatură a mediului ambiant de 25°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) și au fost efectuate câte cinci testări pentru fiecare unghi de înclinare a mandrinei mobile, de la 8 la 20 de grade.

Media rezultatelor obținute în urma testelor efectuate pe epruvetele RS-5cpm, sunt prezentate în tabelul 3.8.

Tabelul 3. 8. Media rezultatelor obținute în urma efectuării testului pe epruvetele RS-5cpm.

Unghiul de înclinare (°)	RS-5cpm (cicluri)	σ_{\max} (MPa)
8	59000	35,8
10	21100	47,7
11	18600	57,3
12	17100	59,7
13	15500	63,2
14	12200	65,6
15	9800	69,2
16	6600	74,1
17	4800	77,6
18	2900	78,8
19	2400	87,2
20	1400	90,7

În figura 3.14 sunt prezentate curbele S-N ale materialului realizat din rășină epoxidică EPIPHEN RE 4020 cu întăritor DE 4020, căruia i s-a aplicat un tratament termic în trei etape și care a fost supus la teste de oboseală (RTT), apoi la solicitări cumulate, oboseală cu uzură într-o cuplă polimer-polimer (RS5-Mp) și la solicitări cumulate, oboseală cu uzură, într-o cuplă polimer-metal (RS-5cpm).

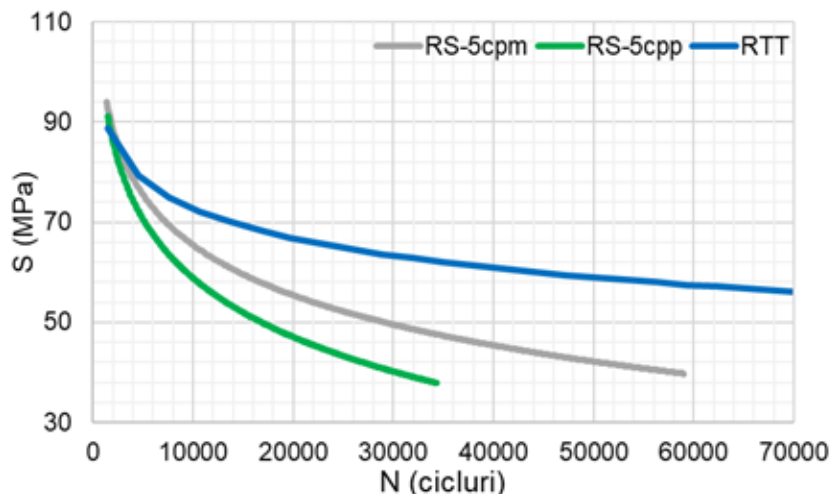


Figura 3. 14. Comparație între epruvetele RTT, RS-5cpm și RS5-Mp.

Materiale aditivate cu 2,5% pulberi de aramidă

Un eșantion din epruvetele realizate din rășină epoxidică EPIPHEN RE 4020 cu întăritor DE 4020, supuse la tratament termic în trei etape și aditivate cu 2,5% pulberi de aramidă, au fost supuse testelor de oboseală cu uzare, într-o cuplă polimer-metal, numite în continuare epruvete RA2,5-5cpm.

Media rezultatelor testelor de oboseală cu uzare aplicate epruvetelor RA2,5-5cpm sunt prezentate în tabelul 3.9.

Tabelul 3. 9. Media rezultatelor obținute pentru epruvetele RA2,5-5cpm, în urma efectuării testelor de oboseală cu uzare într-o cuplă polimer-metal.

Unghiul de înclinare (°)	RA2,5-5cpm (cicluri)	σ_{max} (MPa)
8	51600	35,8
10	42500	47,7
11	37800	57,3
12	15200	59,7
13	12300	63,2
14	10700	65,6
15	7200	69,2
16	5600	74,1
17	4600	77,6
18	3200	78,8
19	2700	87,2
20	1900	90,7

În figura 3.15 este prezentată curba de oboseală S-N obținută în urma testelor de oboseală cu uzare, într-o cuplă polimer-metal, pentru epruvetele RA2,5-5cpm, precum și curba S-N obținută pentru epruvetele RTT. Pentru o mai bună vizualizare în vederea comparației celor două curbe, axa longitudinală a fost limitată la 80.000 de cicluri.

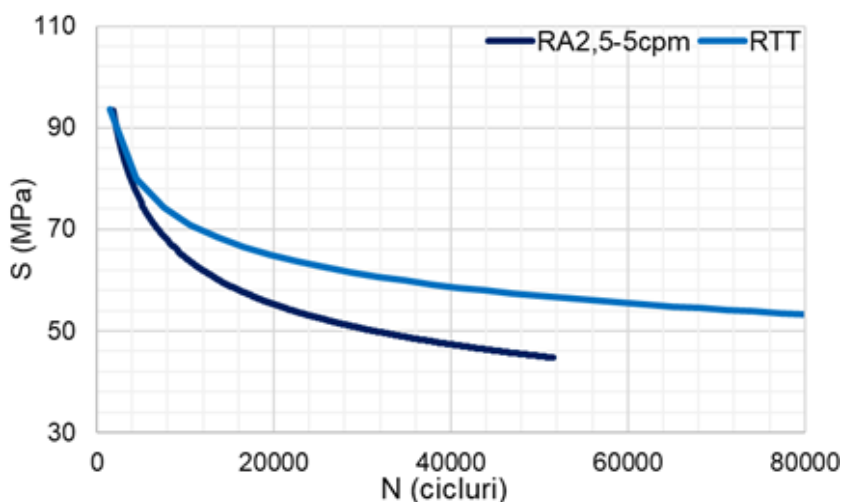


Figura 3. 15. Curbele S-N pentru epruvetele RA2,5-5cpm și pentru epruvetele RTT.

Pentru a compara rezultatele obținute în urma testelor de oboseală și cumulate, oboseală cu uzare, pentru materialul compozit format din rășină polimerică epoxidică EPIPHEN RE 4020, cu întăritor DE 4020, aditivată cu pulbere de aramidă în proporție de 2,5% supus la tratament termic în trei etape, au fost suprapuse cele trei curbe S-N sub forma unui grafic în figura 3.16, unde axa longitudinală a fost limitată la 200.000 de cicluri.

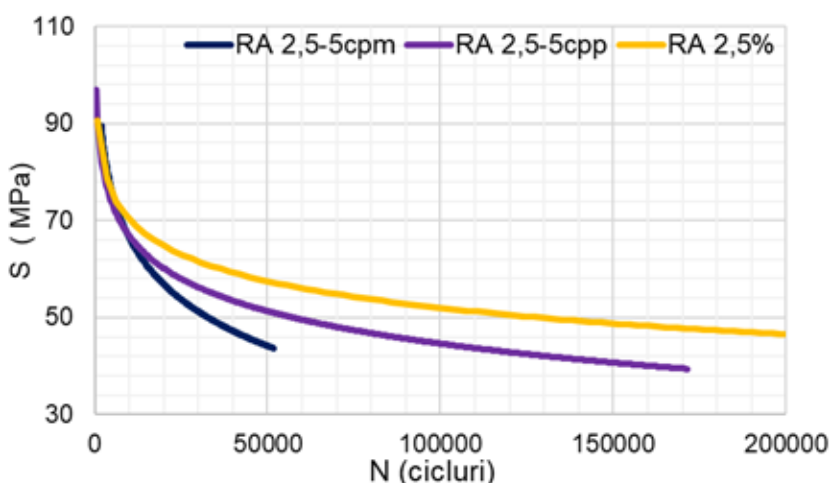


Figura 3. 16. Comparație între curbele S-N ale epruvetelor RA 2,5%, RA2,5%-5Np și RA2,5-5cpm

Analizând graficul din figura 3.16 se observă că materialul compozit RA 2,5%, în cazul unei cuple polimer-metal (RA2,5-5cpm), prezintă o performanță foarte scăzută din punct de vedere al obosealii cumulate cu uzarea, cauzele fiind acumularea căldurii în zona de contact și o slabă disipare a acesteia în toată masa materialului sau reținerea temperaturii, fără a o ceda contrapiesei metalice.

Materiale aditivate cu 3% ulei sintetic

O parte din epruvetele realizate din rășină epoxidică EPIPHEN RE 4020, cu întăritor DE 4020, supuse la tratament termic în trei etape și aditivate cu 3% ulei sintetic, au fost supuse la teste de oboseală cumulată cu uzare, într-o cupla polimer-metal (numite în continuare epruvete RU3-5cpm), pentru a observa cum, dacă sau în ce procent, uzura influențează oboseala materialului respectiv.

Media rezultatelor obținute în urma proceselor de oboseală cu uzare efectuate pe epruvetele RU3-5cpm sunt prezentate în tabelul 3.10.

Tabelul 3. 10. Media rezultatelor obținute pentru epruvetele RU3-5cpm, în urma efectuării testelor de oboseală cu uzare.

Unghiul de înclinare (°)	RU3-5cpm (cicluri)	σ_{max} (MPa)
8	71000	35,8
10	54500	47,7
11	34200	57,3
12	23000	59,7
13	16900	63,2
14	14800	65,6
15	11600	69,2
16	9700	74,1
17	6100	77,6
18	4500	78,8
19	3700	87,2
20	2500	90,7

În figura 3.17 sunt prezentate curbele S-N ale epruvetelor RU3-5cpm obținute în urma testelor de oboseală cu uzare, într-o cuplă polimer-metal, și ale epruvetelor RTT. Axa longitudinală a fost limitată la 80.000 de cicluri, pentru o mai bună vizualizare, în vederea comparației între cele două curbe de oboseală.

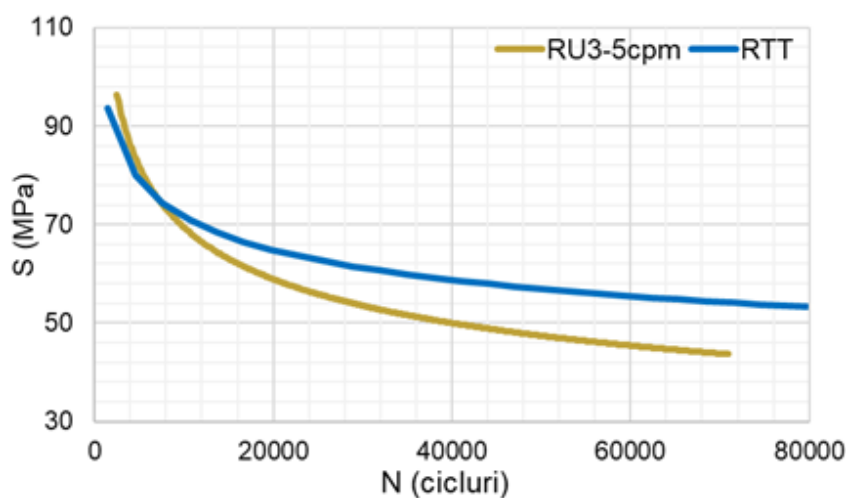


Figura 3. 17. Curba S-N pentru epruvetele RU3-5cpm.

Figura 3.18 reprezintă un grafic care cuprinde curbele de oboseală S-N ale materialului compozit format din rășină polimerică epoxidică Epiphen RE 4020, cu întăritor DE 4020, tratată termic în trei etape, aditivată cu ulei sintetic în proporție masică de 3% și care a fost supus la solicitări de oboseală (RU 3%), la solicitări cumulate de oboseală cu uzare într-o cuplă polimer-polimer (RU3-5cpp), precum și la solicitări cumulate de oboseală cu uzare într-o cuplă polimer-metal (RU3-5cpm). Axa longitudinală a fost limitată la 200.000 de cicluri, pentru o mai bună vizualizare a rezultatelor.

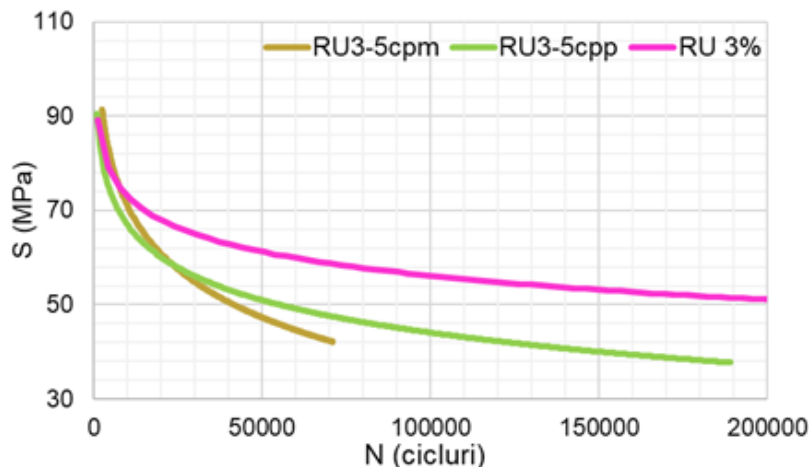


Figura 3. 18. Comparație între curbele de oboseală S-N ale epruvetelor RU 3%, RU3-5cpm și RU3-5cpp.

Analizând graficul din figura 3.18 se observă că materialul compozit realizat din rășină polimerică epoxidică Epiphen RE 4020 cu întăritor DE 4020, tratat termic în trei etape și aditivat cu ulei sintetic în proporție masică de 3%, are o performanță foarte scăzută la oboseală cu uzare, în cazul unei cuple de frecare polimer-metal.

Din punctul de vedere al rezistenței la oboseală cumulată cu uzare provocată prin frecare cu alunecare într-o cuplă polimer-metal, unde forța de apăsare a contrapiesei a fost de 5N, materialul polimeric care prezintă cele mai bune caracteristici este cel aditivat cu ulei sintetic 3%, urmat de cel aditivat cu pulberi de aramidă în proporție de 2,5%, iar ultimul este cel neaditivat. Aceste aspecte sunt vizibile în graficul prezentat în figura 3.19.

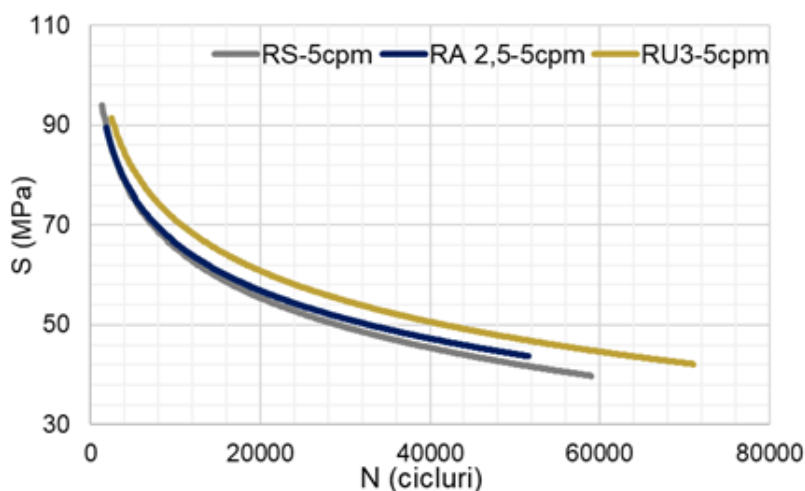


Figura 3. 19. Comparație între RS-5cpm, RA2,5%-cpm și RU3-5cpm.

3.3 Concluzii parțiale

În urma analizării rezultatelor obținute după efectuarea testelor la oboseală cumulate cu cele de uzare, pentru materialele prezentate se poate spune că:

- Epruvetele care au fost confecționate din rășină epoxidică Epyphen RE 4020, cu întăritor DE 4020 (RTT), au o rezistență foarte scăzută la solicitările cumulate de uzură cu oboseală.

- Uzura apare mai repede în cazul epruvetelor RTT, fapt care generează subțierea zonei supuse celor două solicitări, având ca efect negativ creșterea și acumularea temperaturii în zona respectivă.
 - Din punct de vedere termic epruvetele RA 2,5 % sunt mai rezistente, decât epruvetele RTT, dar din cauza dispersiei slabe a căldurii în toată masa epruvetelor, aceasta se acumulează în zona de contact, conducând la o supraîncălzire a acestei zone, fapt care conduce la scăderea rezistenței mecanice.
 - Epruvetele RA2,5% au o rezistență crescută la uzură, în comparație cu cele RTT și RU 3%.
 - Epruvetele aditivate cu ulei sintetic au o dispersie a căldurii mai accelerată, fapt care conduce la menținerea unei temperaturi scăzute în zona de contact.
 - În cazul cuplelor polimer-polimer cele mai indicate materiale de utilizat sunt cele aditivate, deoarece au o durată de viață și o rezistență la oboseală cu uzare mult mai mare, decât cele neaditivate.
 - În cazul cuplelor polimer-metal materiale aditivate cu ulei sintetic, în proporție de 3%, sunt cele mai indicate de folosit, în comparație cu celelalte materiale.
 - Analizând graficele temperaturilor se observă că epruvetele aditivate cu ulei sintetic, în proporție de 3% (RU 3%), au o temperatură de rupere foarte scăzută, urmând cele aditivate cu aramidă (RA2,5 %) și ultimele, cele neaditivate (RTT). Ținând cont că temperatura are un rol foarte important în determinarea proprietăților materialelor polimerice epoxidice, în cazul utilizării acestora în cuple de frecare, cele mai indicate sunt cele aditivate cu ulei sintetic.

Capitolul 4

Modelarea proceselor de oboseala cu uzare cu ajutorul rețelelor neuronale

4.1 Rețele neuronale

Rețelele neuronale sunt sisteme de calcul paralel care funcționează analog cu creierul biologic: o structură formată din unități elementare de calcul (neuroni artificiali), interconectate prin legături similare sinapselor, caracterizate de mărimi specifice - ponderi, structură conectată cu exteriorul prin porturi de intrare, respectiv ieșire. Neuronii artificiali sunt elemente de calcul care procesează informația primită cu o funcție de transfer specifică și o transmit mai departe.

Modul de funcționare al unei rețele neuronale constă în modificarea valorii ponderilor astfel încât la date de intrare cunoscute să se obțină la ieșire valori cunoscute (etapa de antrenare sau învățare) și livrarea de valori necunoscute pentru date de intrare cunoscute (etapa de predicție). De subliniat este faptul că o rețea neuronală furnizează date de ieșire cu o anumită eroare a cărei valoare este prestabilită și acceptată de utilizator. Deși, comparativ cu sistemele de calcul algoritmice aceasta eroare reprezintă un dezavantaj, este compensat de faptul că nu sunt necesare relații matematice pentru descrierea datelor prelucrate.

Pentru problemele care implică predicție sau optimizare structura recomandată este cea de tip "Feed-forward" [93],[94]. În această structură, figura 4.1 [95], neuronii artificiali sunt dispuși pe mai multe straturi, dintre care două cu funcții specifice: stratul de intrare, neuronii din acest strat servind ca intrări în rețea și stratul de ieșire a cărui funcție de a livra în exterior datele prelucrate de rețea. Aceste două straturi sunt singurele disponibile pentru interacțiunea cu utilizatorul, celelalte straturi (numite straturi ascunse) nu pot fi accesate de utilizator.

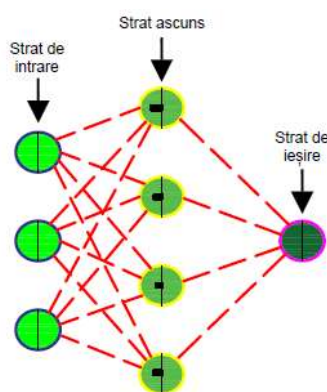


Figura 4. 1 Rețea neuronală cu structură „Feed-forward”

Rețelele neuronale sunt utilizate pe larg în modelarea, simularea și analiza proceselor în care sunt implicate materiale polimerice [96], [97], [98], [99].

4.2 Bazele modelării cu rețele neuronale

Construirea unui model bazat pe rețele neuronale presupune utilizarea unui software specializat și parcurgerea câtorva etape de lucru: [93],[94]

- Identificarea perechilor de date intrare-ieșire cunoscute
- Alegerea și optimizarea arhitecturii rețelei
- Antrenarea rețelei
- Validarea rețelei

Un model neuronal poate fi utilizat pentru mai multe scopuri: analiza importanței și sensibilității, predicție și optimizare.

Modelul neuronal poate fi utilizat pentru stabilirea valorilor de intrare corespunzătoare unor valori de ieșire extreme: minime sau maxime.

4.3 Modelarea proceselor de oboseală cu uzare

4.3.1 Identificarea perechilor de date intrare-ieșire cunoscute

Scopul modelării neuronale prezentate, este analiza datelor experimentale obținute în urma testelor de oboseală cu uzare efectuate pe materialele studiate. În acest scop este necesară identificarea parametrilor de intrare-ieșire corespunzători și stabilirea limitelor valorilor acestora, tabelul 4.1.

Tabelul 4. 1 Parametri și valori limite

Parametri de intrare	Valori extreme		Parametri de ieșire	Valori extreme	
	Minime	Maxime		Minime	Maxime
Unghi	8°	20°	Număr de cicluri	645	1250000
Încărcare	0 N	5 N			
Aramidă	0	1			
Ulei	0	1			
Polimer	0	1			
Metal	0	1			

Ca parametru de ieșire a fost ales numărul de cicluri până la ruperea epruvetei.

4.3.2 Alegerea și optimizarea arhitecturii rețelei

În această etapă se urmărește identificarea unei arhitecturi de rețea neuronală optimă pentru problema propusă. În acest scop se introduc perechile de date inițiale într-un pachet software dedicat (Pythia), capabil să determine structura optimă a rețelei neuronale aferente unei probleme specifice utilizând un algoritm genetic.

4.3.3 Antrenarea și validarea rețelei

În această etapă sunt prezentate rețelei perechile de date de intrare-ieșire cunoscute, cu scopul configurării ponderilor interne astfel încât rețeaua să modeleze fenomenul studiat. Condiția de finalizare a antrenării rețelei este: coeficientul de corelație $R > 0.999$, valoare recomandată în cazul modelării materialelor polimerice [100]. În figura 4.2 se prezintă graficul de evoluție al erorilor pe parcursul etapei de învățare, condiția impusă fiind îndeplinită după 611000 cicluri.

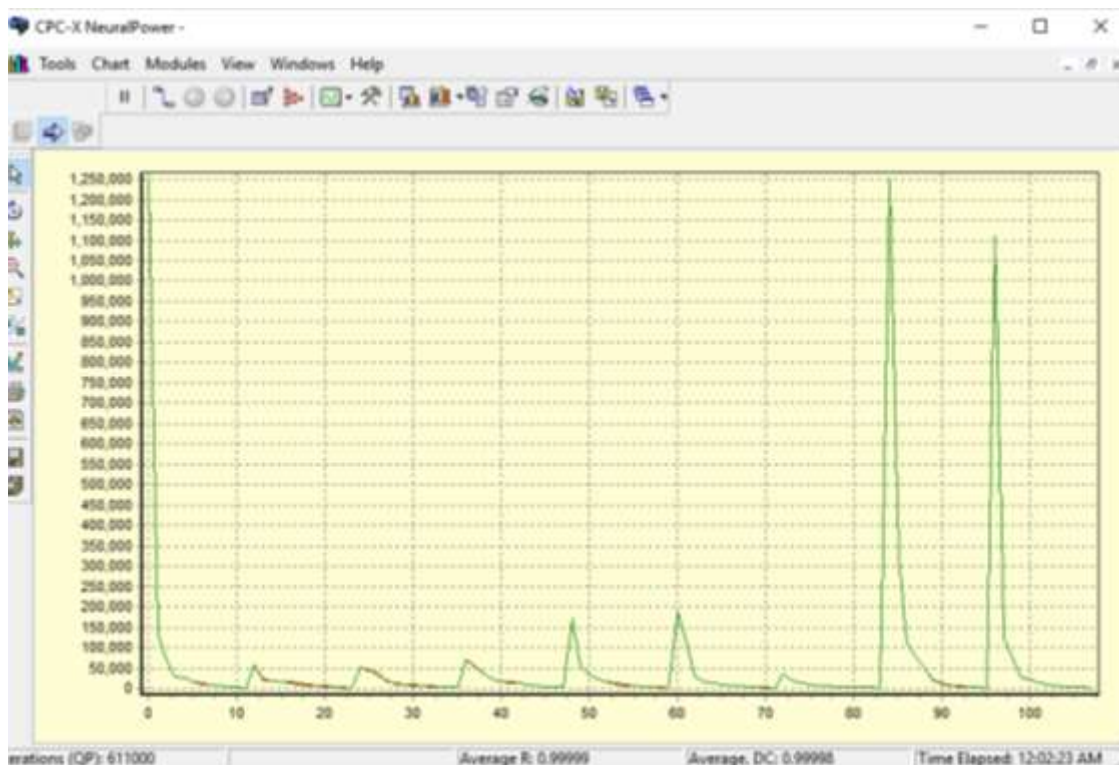


Figura 4. 2 Evoluția erorii pe perioada de antrenare

Etapa de validare constă în prezentarea rețelei a unor perechi de date care nu au fost utilizate la antrenare, pentru fiecare tip de test, etapa considerându-se încheiată atunci când se obține o eroare mai mică de 8% [101]. Rezultatul validării este prezentat în tabelul 4.2.

Tabelul 4. 2 Rezultatul validării

Număr de cicluri	Nr cicluri - reali	Nr cicluri - rețea	Eroare [%]
Fără uzare (Rășină pură) RTT	1250000	1250332	-0.026
Fără uzare (aditiv ulei sintetic 3%) RU3%	1250000	1249997	0.00024
Fără uzare (aditiv aramidă 2.5%) RA2.5%	1100000	1110000	0.9
Cu uzare polimer-polimer	34300	34298	0.005
Cu uzare polimer-metal	58000	58992	-1.71
Cu uzare (aditiv ulei sintetic, cuplă polimer polimer)	189000	188998	0.001
Cu uzare (aditiv ulei sintetic, cuplă polimer metal)	71000	71100	-0.14
Cu uzare (aditiv aramidă, cuplă polimer polimer)	171400	171393	0.004
Cu uzare (aditiv aramidă, cuplă polimer metal)	51600	51490	0.21
Eroarea medie absolută			0.332

4.3.4 Analiza importanței și sensibilității

Unul dintre beneficiile oferite de modelul neuronal este prezentarea unor ierarhii ale parametrilor de intrare, ordonați după gradul de influență și sensibilitate asupra ieșirii, figura 4.3.

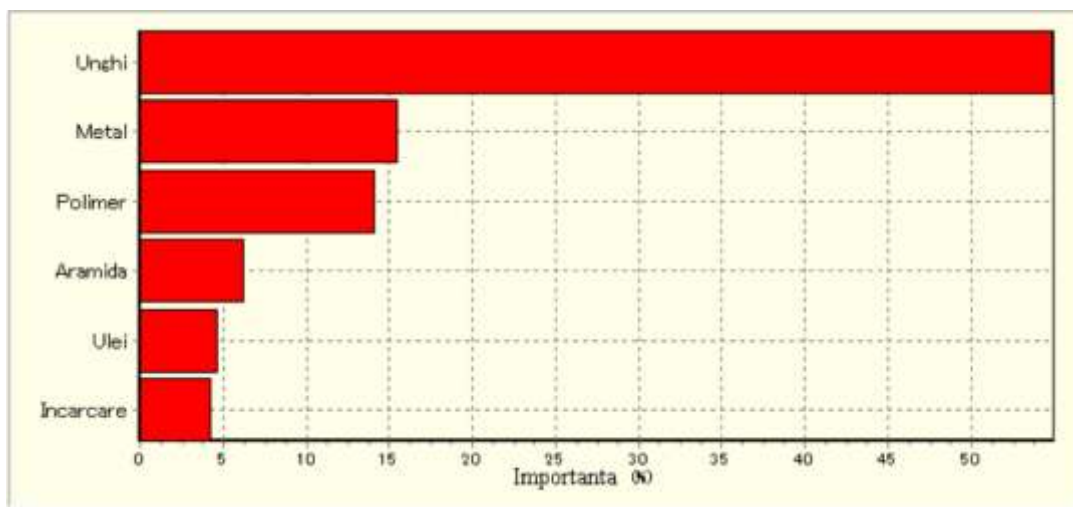


Figura 4. 3 Ierarhiile importanței.

Se observă în figura 4.3 că influența maximă asupra rezistenței la oboseală cu uzare a materialelor testate, o are unghiul de îndoire. De aici se poate trage concluzia că solicitarea la oboseală - indusă de unghiul de îndoire, constituie principala solicitare ce conduce la distrugerea prin acest tip de solicitare compusă.

Influența aditivilor utilizați se situează pe penultima poziție, dovedind că influența acestora este minimă.

4.3.5 Predicție

Modelul neuronal propus poate fi utilizat și pentru predicția numărului de cicluri de oboseală la care rezistă materialul testat, în condițiile în care valorile parametrilor de intrare sunt combinate în alte variante decât cele utilizate pentru achiziționarea datelor inițiale, singura condiție fiind ca aceste valori să fie cuprinse între limitele minime-maxime utilizate în etapa de antrenare.

Valorile predicționate ale numărului de cicluri de oboseală pot fi utilizate pentru programarea operațiilor de mentenanță, astfel încât să fie eliminată posibilitatea apariției unor distrugereri neașteptate.

4.3.6 Optimizare

Procedura de optimizare oferită de modelul bazat pe rețele neuronale constă în determinarea valorilor parametrilor de intrare corespunzătoare unor valori extreme (minime sau maxime) ale ieșirii sau unor valori impuse de utilizator.

În tabelul 4.3 sunt prezentate valorile maxime obținute în etapa de optimizare pentru solicitări la oboseală și oboseală cu uzare în cuple de frecare polimer-polimer, respectiv polimer-metal, precum și pentru o valoare dorită a numărului de cicluri.

Tabelul 4. 3 Valori optimizate pentru numărul de cicluri.

Număr de cicluri	Valori intrări
Oboseală fără uzare	Unghi = 8°
Valoare optimizată = 1278676	Încărcare = false
Valoare măsurată = 1268254	Aramidă = 0
Eroare = -0.821 %	Ulei = 0.9

	Polimer= false Metal = false
Uzare - cuplă polimer-polimer Valoare optimizată = 480697 Valoare măsurată = 471960 Eroare = -0.1851 %	Unghi = 9.2° Încărcare = 0 Aramidă = 0 Ulei = 1.8 Polimer= true Metal = false
Uzare - cuplă polimer-metal Valoare optimizată = 390730 Valoare măsurată = 392105 Eroare = 0.350 %	Unghi = 8° Încărcare = 0 Aramidă = 0 Ulei = 3 Polimer=false Metal = true
Valoare impusă = 52689 Valoare măsurată = 52996 Eroare = 0.579	Unghi = 10.4° Încărcare = 3.5 Aramidă = 0 Ulei = 0 Polimer=true Metal = false
Eroare medie absolută valori optimizate	0.483 %

În urma efectuării unor teste suplimentare, cu valorile de intrare obținute în urma optimizării s-a obținut o valoare medie a erorii absolute de 0.483%, ceea ce validează aplicabilitatea modelului neuronal propus.

4.4 Concluzii parțiale

În urma celor prezentate mai sus se pot evidenția o serie de concluzii:

- Modelarea cu ajutorul rețelelor neuronale este deosebit de utilă în cazul proceselor în care sunt implicate materiale polimerice, acest tip de materiale având o comportare neliniară.
- În cazul solicitărilor de oboseală cu uzare, utilizarea unui model bazat pe rețele neuronale este deosebit de oportună, oferind multiple posibilități precum:
 - analiza importanței parametrilor de intrare asupra ieșirii: prin această analiză se identifică parametrii cu influență maximă (pozitivă sau negativă) asupra numărului de cicluri
 - predicția rezistenței la oboseală - sub forma numărului de cicluri: permite stabilirea valorii numărului de cicluri pentru o combinație de valori de intrare diferită față de cea obținută prin măsurătorile experimentale
 - optimizarea valorilor de ieșire, în sensul de obținere a unor valori maxime sau minime: prin această procedură se pot identifica valorile extreme ale numărului de cicluri, inclusiv în ipoteza că anumiți parametri de intrare au valori prescrise.

Capitolul 5

Concluzii generale, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare

5.1 Concluzii generale

În cadrul acestei teze de doctorat s-au efectuat o serie de teste pentru a determina durata de viață a unor materiale polimerice termorigide și a unor materiale compozite, realizate din rășină epoxidică, aditivată cu diverși aditivi. De asemenea, aceste materiale au fost supuse și la solicitări simultane de oboseală cu uzare, pentru a determina dacă uzarea are o influență majoră asupra duratei de viață a materialelor testate.

Ca urmare a efectuării acestor teste, precum și a documentărilor efectuate în vederea realizării acestora, pot fi elaborate următoarele concluzii:

- Materialele polimerice termorigide, precum și compozitele cu matrice polimerică termorigidă, au cunoscut în ultimul timp o dezvoltare accentuată, drept urmare sunt utilizate în toate domeniile industriale, cu precădere în industria eoliană, navală, a autovehiculelor, electronicelor etc.
- Pentru realizarea compozitelor cele mai folosite materialele polimerice termorigide sunt rășinile epoxidice, datorită proprietăților deosebite ale acestora, precum aderența și compatibilitatea ridicată la o gamă diversă de materiale.
- Studiul comportării materialelor polimerice, atunci când sunt supuse la diverse solicitări, a fost și este preocuparea cercetătorilor din domeniu deoarece, cunoscând aceste aspecte, se pot îmbunătăți proprietățile (mecanice, tribologice, termice etc.) acestora.
- Literatura de specialitate oferă numeroase rezultate ale cercetărilor și experimentelor realizate pe materiale polimerice termorigide, pentru determinarea proprietăților mecanice, acestea fiind obținute prin încercări tribologice sau la încovoiere, întindere și compresiune. În ceea ce privește oboseala și uzarea materialelor polimerice termorigide, precum și a compozitelor polimerice termorigide, sunt mult mai puține studii care să investigheze aceste aspecte și, în orice caz, acestea au fost efectuate separat.
- În această teză de doctorat s-a studiat influența uzurii asupra oboselii materialelor polimerice termorigide sau, mai bine zis, dacă și în ce mod este influențată durata de viață a unor materiale polimerice termorigide (simple sau compozite, aditate cu diverși aditivi sau polimerizate folosind diverse metode), atunci când sunt supuse la solicitări simultane de oboseală cu uzare.
- Standul realizat pentru efectuarea testelor de oboseală a fost mult îmbunătățit după primele teste efectuate, în așa fel încât rezultatele ulterioare au fost concludente și, cu ajutorul acestora, s-a putut determina Curba lui Wöhler pentru materialele supuse testelor.
- Dispozitivul cu ajutorul căruia s-a realizat uzarea prin frecare cu alunecare, atașat standului de testare a oboselii, și-a dovedit eficacitatea, întrucât acesta, a făcut posibilă realizarea testelor la solicitări compuse de oboseală cu uzare.

- Camera cu termoviziune și camera de luat vederi, au avut un rol foarte important în evaluarea și interpretarea rezultatelor,
 - În urma testelor preliminare de oboseală s-au putut stabili o serie de parametri precum: schema optimă de polimerizare; cantitățile admisibile de aditivi, precum și momentul în care acestea trebuie introduse în matrice; etalonul de comparație pentru rezultatele ulterioare,
 - Etalonul în acest studiu, îl reprezintă rezultatele epruvetelor tratate termic, cărora li s-au aplicat schema de tratare termică în trei etape. Datele rezultate în urma testelor la oboseală, arată că:
 - durata de viață a epruvetelor este influențată atât de schema tratamentului termic aplicat, cât și de gradul de înclinare a mandrinei mobile (gradul de încovoiere al epruvetelor),
 - analizând comparativ datele, se poate observa că epruvetele tratate termic, au o durata de viață mai mare cu peste 92 % față de cele polimerizate natural, în cazul în care mandrina mobilă este înclinată cu un unghi de 8 grade,
 - durata de viață a acestora are o tendință de scădere logaritmică, în urma creșterii gradul de înclinare a mandrinei mobile. Astfel, pentru gradul de înclinare maxim la care au fost efectuate testele (20 grade), epruvetele tratate termic, rezistă la un număr de cicluri mai mare cu circa 56 %, decât cele care au fost polimerizate natural,
 - analizând mediile duratei de viață ale celor două tipuri de epruvete comparate, se observă că epruvetele tratate termic au o durată de viață mai mare cu aproximativ 87 %,
 - comparând mediile rezultatelor epruvetelor utilizate ca etalon și a celor aditivate cu pulberi de aramidă în proporție de 2,5 %, se observă că acestea din urmă au o durată de viață la oboseală mai mică cu aproximativ 11%,
 - în ceea ce privește compararea mediilor rezultatelor dintre etalon și epruvetele aditivate cu 3 % ulei sintetic, se observă că epruvetele aditivate s-au dovedit mai rezistente, față de etalon, cu aproximativ 19 %,
 - așadar, în cazul testelor de oboseală, cele mai bune rezultate s-au obținut cu epruvetele aditivate cu ulei sintetic în proporție de 3 %,
 - Comparând mediile rezultatelor etalonului cu cele ale epruvetelor care au fost supuse la solicitări cumulate de oboseală cu uzare în cadrul cuplelor de frecare polimer-metal, se observă că:
 - etalonul are o durată de viață mai mare cu 89 % față de epruvetele simple, cărora li s-au aplicat un tratament termic în trei etape,
 - față de epruvetele aditivate cu 2,5 % pulberi de aramidă, etalonul rezistă la oboseală cu uzare, mai mult cu 87 %,
 - în cazul epruvetelor aditivate cu ulei sintetic în proporție de 3 % , media rezultatelor arată că etalonul rezistă mai mult cu 83 %,
 - în concluzie, în cazul solicitărilor cumulate de oboseală cu uzare în cuple de frecare polimer-metal, rezultatele arată că materialul polimeric aditivat cu 3 % ulei sintetic, prezintă caracteristici mai ridicate față de cele aditivate cu 2,5 % pulberi de aramidă, cât și față de cele simple,
 - În cazul epruvetelor care au fost supuse la solicitări cumulate de oboseală cu uzare în cadrul cuplelor de frecare polimer-polimer, mediile datelor obținute și comparate cu etalonul, arată că:
 - epruvetele simple, cărora li s-au aplicat un tratament termic în trei etape au o rezistență mai scăzută la oboseală cu aproximativ 93 % față de etalon,
 - epruvetele aditivate cu 2,5 % pulberi de aramidă, față de etalon rezistă la oboseală cu aproximativ 79 % mai puțin,
 - epruvetele aditivate cu ulei sintetic 3 % au o rezistență mai scăzută la oboseală decât etalonul, cu aproximativ 75 %,
 - în concluzie, în cazul solicitărilor cumulate de oboseală cu uzare în cuple de frecare polimer-polimer, rezultatele arată că dintre cele trei materiale supuse testelor, ca și în cazul unei cuple de frecare polimer-metal, cele mai bune performanțe, le prezintă materialului aditivat cu 3 % ulei.

- Utilizarea unor programe cu rețele neuronale este foarte utilă pentru predicția și optimizarea unor parametri ai materialelor polimerice, deoarece acestea prezintă un comportament neliniar.
 - În cadrul acestor studii, programul *Neural Power* a validat datele obținute experimental, confirmând că importanța cea mai mare, atât în cazul oboselei, cât și în cazul oboselei cu uzare, o are unghiul de îndoire al epruvetei precum și schema tratamentului termic aplicat, iar cea mai mică importanță având-o aditivii utilizați (în cazul acesta).
 - Rezultatele experimentale au scos în evidență faptul că materialul polimeric aditivat cu ulei sintetic în proporție masică de 3 %, prezintă caracteristici îmbunătățite atât la solicitări de oboseală cât și la solicitări cumulate de oboseală cu uzare. Date au fost validate prin intermediul inteligenței artificiale, mai exact rețele neuronale (aplicația informatică *Neural Power*).
 - A fost efectuată o optimizare cu ajutorul rețelelor neuronale, asupra materialelor polimerice studiate și introduse spre analiză. Pe baza rezultatelor obținute s-au efectuat teste pe stand, iar rezultatele experimentale au confirmat că preconizarea a fost bună, deoarece eroarea medie absolută a valorilor optimizate a fost de 0.483 %.

5.2 Contribuții personale

Contribuțiile personale în determinarea efectului sinergic al proceselor de uzare și oboseală asupra degradării materialelor polimerice sunt:

- Documentarea în vederea stabilirii nivelului de inovare în domeniul materialelor polimerice termorigide, precum și a studiilor realizate cu privire la oboseala, uzarea și oboseala cu uzare a acestor materiale;
- Obținerea unor materiale compozite, având matrice epoxidică aditivată cu pulberi de aramidă sau ulei sintetic;
- Determinarea modului optim de amestecare a rășinii epoxidice cu aditivii;
- Analizarea dispersiei aditivilor în rășina epoxidică;
- Conceperea unui protocol pentru testarea materialelor polimerice termorigide la solicitări de oboseală și oboseală cu uzare;
- Construcția și îmbunătățirea unui stand care permite efectuarea testelor la oboseală;
- Realizarea unui dispozitiv de frecare care poate fi atașat standului și cu ajutorul căruia se pot efectua teste de oboseală cu uzare;
- Conceperea unei metodologii pentru monitorizarea temperaturii epruvetelor;
- Conceperea unei metodologii de captare a imaginilor, pentru a urmări evoluția uzurii asupra materialelor testate;
- Analizarea la microscop a rupturilor rezultate în urma testărilor;
 - Determinarea tipului de distrugere a materialelor testate, prin observarea caracteristicilor distrugerii cauzate de supunerea acestora la solicitări variabile sau cauzate de atingerea temperaturii T_g ;
- Obținerea unor date experimentale, cu ajutorul cărora s-au putut determina curbele de oboseală a materialelor studiate;
- Utilizarea rețelelor neuronale pentru construirea și validarea unor modele care pot simula și optimiza cantitățile de aditivi sau modul de amestec al acestora;
- Realizarea unor simulări, cu datele oferite de rețelele neuronale, în vederea creării unor noi materiale, precum și determinarea duratei de viață a acestora;
- Determinarea influenței uzurii asupra rezistenței la oboseală a materialelor polimerice termorigide.
- Influența diversilor aditivi asupra diminuării uzurii.

5.3 Direcții viitoare de cercetare

Pe baza documentărilor, a experimentelor efectuate, precum și a experiențelor personale acumulate, pentru cercetările viitoare îmi propun:

- Investigarea comportării unor materiale polimerice termorigide sau compozite pe bază de rășini epoxidice, atunci când acestea sunt supuse la solicitări de oboseală cumulate cu uzare, la temperaturi negative.
- Realizarea unor materiale polimerice utilizând diverși aditivi, care să faciliteze dispersia sau cedarea căldurii din zona puternic solicitată, precum și Investigarea comportării la uzare și uzare cu oboseală a acestora.
- Investigarea comportării unor materiale polimerice termorigide, care vor fi supuse la solicitări de oboseală cu uzare până la apariția primelor fisuri, recondiționarea acestora prin metode specifice și continuarea testării.
- Implementarea unui dispozitiv, pe standul actual, care să permită efectuarea testelor de oboseală cumulate cu uzare provocată prin frecare cu rulare.
- Implementarea unui dispozitiv care să poată fi atașat standului, cu ajutorul căruia să poată fi efectuate teste la oboseală cumulate cu frecare abrazivă sau cu lubrifiere.
- Realizarea unor materiale compozite pe baza predicției și a simulărilor efectuate cu ajutorul softurilor cu rețele neuronale, utilizând datele de intrare obținute în cadrul cercetărilor efectuate pentru elaborarea acestei teze.

Lista lucrărilor publicate

Publicații în reviste indexate WOS

1. **C. Humelnicu**, S. Ciortan, V. Amortila, Artificial Neural Network-Based Analysis of the Tribological Behavior of Vegetable Oil-Diesel Fuel Mixtures, *Lubricants*. 7 (2019) 32.
2. **C. Humelnicu**, V. Amortila, E. Mereuta, Fatigue life investigation on a MAC engine piston, *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2018, 178, 06013.
3. V. Amortila, E. Mereuta, S. Veresiu, M. Rus, **C. Humelnicu**, Positioning study of driver's hands in certain areas of the steering wheel, *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2018, 178, 06014.

Publicații în reviste indexate SCOPUS

1. **C. Humelnicu**, E. Mereuta, V. Amortila, M. Gingarasu, M. Novetschi, Reduction of polymeric waste by applying heat treatments during the polymerization period, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2020, 2020-August(4.1), pp. 475–482.
2. M. Gingarasu, E. Mereuta, V. Amortila, **C. Humelnicu**, M. Novetschi, The importance of vehicle steering system diagnosis in reducing environmental impact, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2020, 2020-August(4.1), pp. 523–530.
3. M. Novetschi, E. Mereuta, M. Gingarasu, **C. Humelnicu**, V. Amortila, The effects of auto pollution on the population, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2020, 2020-August(4.1), pp. 499–506
4. **C. Humelnicu**, E. Mereuta, V. Amortila, M. Gingarasu, Fatigue polymeric materials - Air pollution factor, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2019, 19(4.2), pp. 221–228
5. **C. Humelnicu**, E. Mereuta, V. Amortila, M. Gingarasu, Reducing the air pollution impact of the recycled auto vehicles, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2019, 19(4.1), pp. 1053–1060.
6. M. Gingarasu, E. Mereuta, V. Amortila, **C. Humelnicu**, The influence of the vehicle steering system missalignment on the environment, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2019, 19(4.2), pp. 295–302
7. V. Amortila, E. Mereuta, **C. Humelnicu**, M. Gingarasu, The vibration and noise pollution's impact on the driver, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2019, 19(4.1), pp. 1143–1150.
8. M. Gingarasu, E. Mereuta, V. Amortila, **C. Humelnicu**, The influence of vehicle diagnosis on reducing gas emissions that affects the earth's climate system, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2019, 19(4.1), pp. 1109–1115.
9. V. Amortila, E. Mereuta, **C. Humelnicu**, M. Gingarasu, N. Monica, Controversy about car pollution: The electric vehicle or the classic vehicle?, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2019, 19(4.2), pp. 193–200.

10. **C. Humelnicu**, V. Amortila, E. Mereuta, Neural networks as optimization tools for fuel consumption, International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2018, 18(4.2), pp. 531–537.
11. **C. Humelnicu**, V. Amortila, M. Gingarasu, E. Mereuta, Damaging by tribo-fatigue and test rig design, International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2018, 18(4.3), pp. 235–242.
12. V. Amortila, E. Mereuta, **C. Humelnicu**, M. Gingarasu, Driver's biomechanics influence on air pollution, International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2018, 18(4.3), pp. 251–258.
13. V. Amortila, E. Mereuta, D. Ganea, **C. Humelnicu**, S. Ciortan, Auto transportation-an important factor in pollution growth and in atmospheric changes, International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2018, 18(4.2), pp. 349–356.

Publicații în reviste indexate BDI

1. **C. Humelnicu**, V. Amortila, M. Novetschi, M. Gingarasu, Aspects referring to fatigue testing of epoxy polymeric materials, Mechanical Testing and Diagnosis. 10 (2020) 21–25.
2. M. Gingarasu, E. Mereuta, V. Amortila, **C. Humelnicu**, M. Novetschi, WEAR OF SPHERICAL JOINTS OF THE VEHICLES STEERING SYSTEMS. VIBRATIONS AND THEIR ROLE IN DIAGNOSIS, Mechanical Testing and Diagnosis. 10 (2020) 16–20.
3. **C. Humelnicu**, Re-Engineering of a planetary shaft based on life expectation, Mechanical Testing and Diagnosis. 7 (2017) 14–23.
4. **C. Humelnicu**, APPLICATION OF VISUAL ENVIRONMENT BASED SOFTWARE IN AUTOMOTIVE DESIGN., Annals of the University Dunarea de Jos of Galati: Fascicle II, Mathematics, Physics, Theoretical Mechanics. 40 (2017) 187–190.
5. **C. Humelnicu**, AUTOMOTIVE TRANSMISSION LINE DESIGN WITH VISUAL ENVIRONMENT SOFTWARE., Annals of the University Dunarea de Jos of Galati: Fascicle II, Mathematics, Physics, Theoretical Mechanics. 40 (2017) 191–194.

Lucrări internaționale prezentate la conferințe

1. **Costel Humelnicu**, Valentin Amortilă, Mihai Gingărașu, Elena Mereuță, „ASPECTS REFERRING TO FATIGUE TESTING OF EPOXY POLYMERIC MATERIALS”, „8th Edition Scientific Conference of Doctoral Schools SCDS-UDJG 2020”,
2. Mihai Gingărașu, Elena Mereuță, Valentin Amortilă, **Costel Humelnicu**, Monica Novetschi, „THE WEAR OF THE SPHERICAL JOINTS OF THE VEHICLES STEERING SYSTEMS - VIBRATIONS AND THEIR ROLE IN DIAGNOSIS”, „8th Edition Scientific Conference of Doctoral Schools SCDS-UDJG 2020”,
3. Monica Novetschi, Tarek Nazer, **Costel Humelnicu**, Mihai Gingarasu, Valentin Amortila, „LOWER LIMB ANALYSIS WHEN THE CLUTCH PEDAL IS ACTUATED”, „8th Edition Scientific Conference of Doctoral Schools SCDS-UDJG 2020”,
4. **Costel Humelnicu**, Elena Mereuță, Valentin Amortilă, Mihai Gingărașu, Monica Novetschi, „REDUCTION OF POLYMERIC WASTE BY APPLYING HEAT TREATMENTS DURING THE POLYMERIZATION PERIOD”, „20th International Multidisciplinary Scientific Conferences on Earth and Planetary Sciences SGEM 2020”,
5. Mihai Gingărașu, Elena Mereuță, Valentin Amortilă, **Costel Humelnicu**, Monica Novetschi, „THE IMPORTANCE OF VEHICLE STEERING SYSTEM DIAGNOSIS IN REDUCING ENVIRONMENTAL IMPACT”, „20th International Multidisciplinary Scientific Conferences on Earth and Planetary Sciences SGEM 2020”,

6. Monica Novetschi, Elena Mereuță, Mihai Gingarasu, **Costel Humelnicu**, Valentin Amortila, „THE EFFECTS OF AUTO POLLUTION ON THE POPULATION”, „20th International Multidisciplinary Scientific Conferences on Earth and Planetary Sciences SGEM 2020”,
7. **Costel Humelnicu**, Valentin Amorțilă, Mihai Gingărașu, Monica Novetschi, „Fatigue testing of epoxy resin based materials”, 7th Edition of SCDS-UDJG, 13.06-14.06.2019, Galati-Romania,
8. Amorțilă Valentin-Tiberiu, **Humelnicu Costel**, Gingărașu Mihai, „Mass-spring-damper biomechanical model of the driver”, 7th Edition of SCDS-UDJG, 13.06-14.06.2019, Galati-Romania,
9. Mihai Gingărașu, Elena Mereuță, Valentin Amorțilă, **Costel Humelnicu**, Radu Bosoanca, „Diagnosis of vehicle steering systems using vibration analysis of component parts”, 7th Edition of SCDS-UDJG, 13.06-14.06.2019, Galati-Romania,
10. **Humelnicu Costel**, Mereuță Elena, Amorțilă, Valentin, Gingărașu Mihai, „REDUCING THE AIR POLLUTION IMPACT OF THE RECYCLED AUTO VEHICLES”, 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, 30.06-06.07.2019, Albena - Bulgaria,
11. Amorțilă Valentin, Mereuță Elena, **Humelnicu Costel**, Gingărașu Mihai, „THE VIBRATION AND NOISE POLLUTIONS IMPACT ON THE DRIVER”, 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, 30.06-06.07.2019, Albena - Bulgaria,
12. Gingărașu Mihai, Mereuță Elena, Amorțilă Valentin, **Humelnicu Costel**, „THE INFLUENCE OF VEHICLE DIAGNOSIS ON REDUCING GAS EMISSIONS THAT AFFECTS THE EARTH'S CLIMATE SYSTEM”, 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, 30.06-06.07.2019, Albena - Bulgaria,
13. **Costel Humelnicu**, Elena Mereuță, Valentin Amorțilă, Mihai Gingărașu, „FATIGUE POLYMERIC MATERIALS - AIR POLLUTION FACTOR”, 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, 09.12-11.12.2019, Viena-Austria,
14. Valentin Amorțilă, Elena Mereuță, **Costel Humelnicu**, Mihai Gingărașu, Monica Novetschi, „CONTROVERSY ABOUT CAR POLLUTION: THE ELECTRIC VEHICLE OR THE CLASSIC VEHICLE?”, 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, 09.12-11.12.2019, Viena-Austria,
15. Mihai Gingărașu, Elena Mereuță, Valentin Amorțilă, **Costel Humelnicu**, „THE INFLUENCE OF THE VEHICLE STEERING SYSTEM MISALIGNMENT ON THE ENVIRONMENT”, 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, 09.12-11.12.2019, Viena-Austria,
16. Valentin Amorțilă, Elena Mereuta, Daniel Ganea, **Costel Humelnicu**, Sorin Ciortan, Auto transportation - An important factor in pollution growth and in atmospheric changes, „18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018”, Albena, 2018.
17. Valentin Amortila, Elena Mereuta, Silvia Veresiu, Madalina Rus, **Costel Humelnicu**, Positioning study of driver's hands in certain areas of the steering wheel, „IManEE International Conference 2018”, Chișinău, 2018.
18. Valentin Amorțilă, Elena Mereuta, **Costel Humelnicu**, Mihai Gingărașu, Driver's biomechanics influence on air pollution, „18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018”, Viena, 2018.
19. **Costel Humelnicu**, Valentin Amorțilă, Elena Mereuță, Fatigue life investigation on a MAC engine piston, „IManEE International Conference 2018”, Chișinău, 2018.
20. **Costel Humelnicu**, Valentin Amorțilă, Mihai Gingărașu și Elena Mereuta, Damaging by tribo-fatigue and test rig design, „18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018”, Viena, 2018.
21. **Costel Humelnicu**, Valentin Amortila, Elena Mereuta, Neural networks as optimization tools for fuel consumption, „18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018”, Albena, 2018.

22. Valentin Amorțilă, Elena Mereuță, **Costel Humelnicu**, Daniel Ganea, The analysis of the triple extension of the driver's lower limb, „6th edition of the Scientific Conference of the Doctoral Schools SCDS-UDJG 2018”
23. **Costel Humelnicu**, Valentin Amorțilă, Elena Mereuță, Sorin Ciortan, Aspects of Degradation Throught the Simultaneous Action of Wear and Fatigue on Auto Vehicles, „6th edition of the Scientific Conference of the Doctoral Schools SCDS-UDJG 2018”
24. Mihai-Catalin Radu, **Costel Humelnicu**, Laurentia Andrei, Gabriel Andrei, A Survey on Gear Meshing Features Based on transmission Error Analysis, „6th edition of the Scientific Conference of the Doctoral Schools SCDS-UDJG 2018”

Lucrări premiate la conferințe internaționale

1. Mihai Gingărașu, Elena Mereuță, Valentin Amortilă, **Costel Humelnicu**, Monica Novetschi, The wear of the spherical joints of the vehicles steering systems - Vibrations and their role in diagnosis, 8th Edition Scientific Conference of Doctoral Schools SCDS-UDJG, 2020 – FIRST PRIZE,
2. Amorțilă Valentin-Tiberiu, **Humelnicu Costel**, Gingărașu Mihai, Mass-spring-damper biomechanical model of the driver, 7th Edition of SCDS-UDJG,2019 – FIRST PRIZE,
3. **Costel Humelnicu**, Valentin Amorțilă și Elena Mereuță, Fatigue life investigation on a MAC engine piston, „IManEE International Conference 2018”, 2018 - AWARD CERTIFICATE,
4. Valentin Amorțilă, Elena Mereuță, **Costel Humelnicu**, Daniel Ganea, The analysis of the triple extension of the driver's lower limb, „6th edition of the Scientific Conference of the Doctoral Schools SCDS-UDJG 2018”, 2018 - FIRST PRIZE.

Alte premii obținute

Premiul 2 la concursul de „Planuri de afaceri” din cadrul programului antreprenorial desfășurat în cadrul Activității 5, participant ca membru al grupului țintă al proiectului „BeAntreprenor!” din partea partenerului P2 (Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați)

Bibliografie

1. Marques, A.T. 7 - Fibrous materials reinforced composites production techniques. In *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications*; Fangueiro, R., Ed.; Woodhead Publishing Series in Textiles; Woodhead Publishing, 2011; pp. 191–215 ISBN 978-1-84569-558-3.
2. Buchanan, H.A.; Abu, A.K. *Structural Design for Fire Safety: Second Edition*; 2016;
3. Harper, C.A. *Handbook of Building Materials for Fire Protection*; McGraw Hill Professional, 2003; ISBN 978-0-07-143330-3.
4. Sperling, L. *Introduction to Physical Polymer Science, Fourth Edition*; 2006; Vol. 207; ISBN 978-0-471-70606-9.
5. Wright, W.W. *Handbook of Thermoset Plastics*; Edited by S. H. Goodman, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1986. Pp. Xx + 421, Price \$52.00. ISBN 0-8155-1054-3. *British Polymer Journal* **1987**, *19*, 413–414, doi:https://doi.org/10.1002/pi.4980190330.
6. Dharanidharan, S.; Srivithya, N.; Meena, N. Experimental Study on the Flexural Behavior of E-Waste Plastics in Concrete. *Int. J. Eng. Sci. Res. Technol.* **2015**, *4*, 660–669.
7. Crespy, D.; Bozonnet, M.; Meier, M. 100 Years of Bakelite, the Material of a 1000 Uses. *Angewandte Chemie - International Edition* **2008**, *47*, 3322–3328, doi:10.1002/anie.200704281.
8. Park, B.-D.; Jeong, H.-W. Hydrolytic Stability and Crystallinity of Cured Urea–Formaldehyde Resin Adhesives with Different Formaldehyde/Urea Mole Ratios. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **2011**, *31*, 524–529, doi:10.1016/j.ijadhadh.2011.05.001.
9. Myers, G.E. Mechanisms of Formaldehyde Release from Bonded Wood Products. In *Formaldehyde Release from Wood Products*; ACS Symposium Series; American Chemical Society, 1986; Vol. 316, pp. 87–106 ISBN 978-0-8412-0982-4.
10. Salthammer, T.; Mentese, S.; Marutzky, R. Formaldehyde in the Indoor Environment. *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 2536–2572, doi:10.1021/cr800399g.
11. Rowell, R.M. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*; CRC Press, 2012; ISBN 978-1-4398-5381-8.
12. Pizzi, A.; Lipschitz, L.; Valenzuela, J. Theory and Practice of the Preparation of Low Formaldehyde Emission UF Adhesives. *Holzforschung* **1994**, *48*, 254–261, doi:10.1515/hfsg.1994.48.3.254.
13. Ke, H.; Zhao, L.; Zhang, X.; Qiao, Y.; Wang, G.; Wang, X. Performance of High-Temperature Thermosetting Polyimide Composites Modified with Thermoplastic Polyimide. *Polymer Testing* **2020**, *90*, 106746, doi:10.1016/j.polymertesting.2020.106746.
14. Zhao, X.; Yang, F.; Wang, Z.; Ma, P.; Dong, W.; Hou, H.; Fan, W.; Liu, T. Mechanically Strong and Thermally Insulating Polyimide Aerogels by Homogeneity Reinforcement of Electrospun Nanofibers. *Composites Part B: Engineering* **2020**, *182*, 107624, doi:10.1016/j.compositesb.2019.107624.
15. Mišković-Stanković, V. The Mechanism of Cathodic Electrodeposition of Epoxy Coatings and the Corrosion Behaviour of the Electrodeposited. *Journal of the Serbian Chemical Society* **2002**, *67*, doi:10.2298/JSC0205305M.
16. Yi, X.; Li, D.; Zhao, C.; Shen, L.; Ao, X.; Liu, M.; Zhou, X.; Cui, Y.; Hou, Y. Dynamical Climate Downscaling over Liaoning Area Using Nudging Methods Based on WRF Model (in Chinese). *J. Meteor. Environ* **2018**, *34*, 1–10.

17. Chen, B.; Li, X.; Li, X.; Jia, Y.; Yang, J.; Li, C. Hierarchical Carbon Fiber-SiO₂ Hybrid/Polyimide Composites with Enhanced Thermal, Mechanical, and Tribological Properties. *Polymer Composites* **2018**, *39*, E1626–E1634, doi:10.1002/pc.24570.
18. Duan, L.; Duan, Y.; Wang, Z.; Hu, H.; Zeng, W.; Li, Q. Application of Cellulose Nanofibril Prepared by Fenton Oxidized Method in Polyvinyl Alcohol Composite Films. *Chung-kuo Tsao Chih/China Pulp and Paper* **2020**, *39*, 1–9, doi:10.11980/j.issn.0254-508X.2020.09.001.
19. Tsampas, S.; El-Korashy, A.; Patrignani, M.; Devriese, D.; Garg, D.; Piessens, F. Towards Automatic Compartmentalization of C Programs on Capability Machines. *Workshop on Foundations of Computer Security (FCS)* **2017**, 1–14.
20. Fan, Z.-Z.; He, H.-W.; Yuan, D.; Pang, L.-L.; Huang, Y.-Z.; Long, Y.-Z.; Ning, X. Fabrication of Epoxy Resin Reinforced Polyimide (PI) Nanofibrous Membrane. *Materials Letters* **2019**, *252*, 138–141, doi:10.1016/j.matlet.2019.05.116.
21. Desai, C. Meyler's Side Effects of Drugs: The International Encyclopedia of Adverse Drug Reactions and Interactions. *Indian J Pharmacol* **2016**, *48*, 224.
22. Kumbar, S.; Laurencin, C.; Deng, M. *Natural and Synthetic Biomedical Polymers*; 2014; p. 402;.
23. Bilyeu, B.; Brostow, W.; Menard, K. Epoxy Thermosets and Their Applications II. Thermal Analysis. *J. Mater. Educ.* **2000**, 22.
24. Kochanè, T.; Budrienè, S.; Pielichowski, K.; Pielichowski, J. Application of Polyurethane-Based Materials for Immobilization of Enzymes and Cells: A Review. *Chemija* **2006**, *17*, 74–89.
25. Baronti, F.; Fantechi, G.; Fanucci, L.; Leonardi, E.; Roncella, R.; Saletti, R.; Saponara, S. State-of-Charge Estimation Enhancing of Lithium Batteries through a Temperature-Dependent Cell Model. In Proceedings of the 2011 International Conference on Applied Electronics; September 2011; pp. 1–5.
26. Kayikli, T.; Balikçi, A. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum-Polimer Aküler İçin Bir Şarj Cihazı Tasarımı A Lithium-Polymer Battery Charger Design for Electric Vehicles. 6.
27. Zhang, H.; Zhang, Z.; Breidt, C. Comparison of Short Carbon Fibre Surface Treatments on Epoxy Composites: I. Enhancement of the Mechanical Properties. *Composites Science and Technology* **2004**, *64*, 2021–2029, doi:10.1016/j.compscitech.2004.02.009.
28. May, C.A. *Epoxy Resins: Chemistry and Technology*; Marcel Dekker: New York, 1988; ISBN 978-0-8247-7690-9.
29. Binks, F.C.; Cavalli, G.; Henningsen, M.; Howlin, B.J.; Hamerton, I. Investigating the Mechanism through Which Ionic Liquids Initiate the Polymerisation of Epoxy Resins. *Polymer* **2018**, *139*, 163–176, doi:10.1016/j.polymer.2018.01.087.
30. Adrian, B.D.; Catalin, D.; Ionut, I.; Florin, N.; Cornel, P.M. CERCETARI PRIVIND TESTAREA PRODUSELOR POLIMERICE. **2015**, 8.
31. Mardalizad, A.; Caruso, M.; Manes, A.; Giglio, M. Investigation of Mechanical Behaviour of a Quasi-Brittle Material Using Karagozian and Case Concrete (KCC) Model. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* **2019**, *11*, 1119–1137, doi:10.1016/j.jrmge.2019.01.005.
32. Huang, X.; Karihaloo, B.L. MICROMECHANICAL MODELLING OF THE TENSILE BEHAVIOUR OF QUASI-BRITTLE MATERIALS. In *Advances in Engineering Plasticity and its Applications*; Lee, W.B., Ed.; Elsevier: Oxford, 1993; pp. 267–272 ISBN 978-0-444-89991-0.
33. Szost, B.A.; Terzi, S.; Martina, F.; Boisselier, D.; Prytuliak, A.; Pirling, T.; Hofmann, M.; Jarvis, D.J. A Comparative Study of Additive Manufacturing Techniques: Residual Stress and Microstructural Analysis of CLAD and WAAM Printed Ti-6Al-4V Components. *Materials and Design* **2016**, *89*, 559–567, doi:10.1016/j.matdes.2015.09.115.
34. Luecke, W.E.; Slotwinski, J.A. Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel Made by Additive Manufacturing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* **2014**, *119*, 398–418, doi:10.6028/jres.119.015.
35. Draghici, G.; Zecheru, G. *Elemente de Știința Și Ingineria Materialelor*; ILEX, Editura Universității din Ploiești, 2001; Vol. 24; ISBN 973-99015-8-1.

36. Cetin, A.; Naess, A.; Härkegård, G. A Physically Based Extreme Value Characterization of Material Fatigue. *International Journal of Fatigue* **2013**, *47*, 216–221, doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.09.003.
37. Crawford, R.J.; Martin, P.J. *Plastics Engineering*; Butterworth-Heinemann, 2020; ISBN 978-0-08-100710-5.
38. Dumitru, I.; Faur, N. *Elemente de Calcul Și Aplicații În Rezistența Materialelor*; Timisoara, 1997;
39. Yadav, I.N.; Thapa, Dr.K.B. Strain-Based Theoretical Fatigue Damage Model of Woven Glass-Epoxy Fabric Composite Material. *Composites Part C: Open Access* **2020**, *3*, 100067, doi:10.1016/j.jcomc.2020.100067.
40. Mao, H.; Mahadevan, S. Fatigue Damage Modelling of Composite Materials. *Composite Structures* **2002**, *58*, 405–410, doi:10.1016/S0263-8223(02)00126-5.
41. Hosoi, A.; Kawada, H.; Yoshino, H. Fatigue Characteristics of Quasi-Isotropic CFRP Laminates Subjected to Variable Amplitude Cyclic Two-Stage Loading. *International Journal of Fatigue* **2006**, *28*, 1284–1289, doi:10.1016/j.ijfatigue.2006.02.039.
42. Coleman, B.D.; Gurtin, M.E. Thermodynamics with Internal State Variables. *The Journal of Chemical Physics* **1967**, *47*, 597–613, doi:10.1063/1.1711937.
43. Kang, K.-W.; Lim, D.-M.; Kim, J.-K. Probabilistic Analysis for the Fatigue Life of Carbon/Epoxy Laminates. *Composite Structures* **2008**, *85*, 258–264, doi:10.1016/j.compstruct.2008.01.003.
44. Hansen, U. Damage Development in Woven Fabric Composites during Tension-Tension Fatigue. *Journal of Composite Materials* **1999**, *33*, 614–639, doi:10.1177/002199839903300702.
45. De Vasconcellos, D.S.; Touchard, F.; Chocinski-Arnault, L. Tension-Tension Fatigue Behaviour of Woven Hemp Fibre Reinforced Epoxy Composite: A Multi-Instrumented Damage Analysis. *International Journal of Fatigue* **2014**, *59*, 159–169, doi:10.1016/j.ijfatigue.2013.08.029.
46. Mohammadi, R.; Najafabadi, M.A.; Saghafi, H.; Zarouchas, D. Fracture and Fatigue Behavior of Carbon/Epoxy Laminates Modified by Nanofibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **2020**, *137*, 106015, doi:10.1016/j.compositesa.2020.106015.
47. Pippan, R.; Hohenwarter, A. Fatigue Crack Closure: A Review of the Physical Phenomena. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* **2017**, *40*, 471–495, doi:https://doi.org/10.1111/ffe.12578.
48. Jumahat, A.; Talib, A.A.A.; Abdullah, A. Wear Properties of Nanoclay Filled Epoxy Polymers and Fiber Reinforced Hybrid Composites. In *Nanoclay Reinforced Polymer Composites: Nanocomposites and Bionanocomposites*; Jawaid, M., Qaiss, A. el K., Bouhfid, R., Eds.; Engineering Materials; Springer: Singapore, 2016; pp. 247–260 ISBN 978-981-10-1953-1.
49. Brostow, W.; Kovacevic, V.; Vrsaljko, D.; Whitworth, J. Tribology of Polymers and Polymer-Based Composites. *J. Mater. Educ.* **2010**, *32*, 273–290.
50. Neale, M.J. *The Tribology Handbook*; Butterworth-Heinemann, 1995; ISBN 978-0-7506-1198-5.
51. Buckley, D.H. *Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication*; Elsevier Scientific Publishing Company, 1981; ISBN 978-0-444-41966-8.
52. Pavelescu, D.; Mușat, M.; Tudor, A. *Tribologie; Didactică și Pedagogică*: București, 1977;
53. Sosnovskiy, L.A. *Tribo-Fatigue Wear-Fatigue Damage and Its Prediction*; Springer-Verlag: Berlin, Germany, 2005; ISBN 3-540-23153-6.
54. Vassilopoulos, A.P. *Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures*; Woodhead Publishing in materials; Elsevier Science & Technology, Woodhead Publishing, 2010; ISBN 978-1-84569-525-5.
55. Sosnovskiy, L.A. *Tribo-Fatigue Wear-Fatigue Damage and Its Prediction*; Springer-Verlag: Berlin, Germany, 2005; ISBN 3-540-23153-6.
56. Giudice, F.; Rosa, G.L.; Fargione, G.; Barbagallo, R. Fatigue Limit Assessment by Energetic Analyses in Static and Cyclic Tensile Tests. *Procedia Structural Integrity* **2019**, *24*, 706–711, doi:10.1016/j.prostr.2020.02.062.

57. Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research Available online: <https://www.tms.org/pubs/journals/jom/9811/huang/huang-9811.html> (accessed on 13 December 2020).
58. Solberg, K.; Wan, D.; Berto, F. Fatigue Assessment of As-Built and Heat-Treated Inconel 718 Specimens Produced by Additive Manufacturing Including Notch Effects. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* **2020**, *43*, 2326–2336, doi:10.1111/ffe.13300.
59. Gornet, L.; Wesphal, O.; Burtin, C.; Bailleul, J.-L.; Rozycki, P.; Stainier, L. Rapid Determination of the High Cycle Fatigue Limit Curve of Carbon Fiber Epoxy Matrix Composite Laminates by Thermography Methodology: Tests and Finite Element Simulations. *Procedia Engineering* **2013**, *66*, 697–704, doi:10.1016/j.proeng.2013.12.123.
60. Peyrac, C.; Jollivet, T.; Leray, N.; Lefebvre, F.; Westphal, O.; Gornet, L. Self-Heating Method for Fatigue Limit Determination on Thermoplastic Composites. *Procedia Engineering* **2015**, *133*, 129–135, doi:10.1016/j.proeng.2015.12.639.
61. Humelnicu, C. Re-Engineering of a Planetary Shaft Based on Life Expectation. *Mechanical Testing and Diagnosis* **2017**, *7*, 14–23.
62. Humelnicu, C.; Amortila, V.; Mereuta, E. Fatigue Life Investigation on a MAC Engine Piston. In Proceedings of the MATEC Web of Conferences; EDP Sciences, 2018; Vol. 178, p. 06013.
63. ZwickRoell Materials Testing Systems Available online: <https://www.zwickroell.com/en> (accessed on 15 October 2019).
64. Amsler Prüfsysteme (Schweiz) AG Available online: <http://www.amsler-pruefsysteme.ch/index.php?main> (accessed on 20 February 2020).
65. GHEORGHE, V.; PURCAREA, R. Proiectare Și Realizare Stand În Vederea Determinării de Curbe Wohler La Oboseală Pentru Materiale Compozite. *Buletinul AGIR* **2012**.
66. Ujjwal, M.; Mrinalini, R.; Amritpreet, S. ANALYSIS OF FATIGUE BEHAVIOR OF GLASS/CARBON FIBER EPOXY COMPOSITE. *International Journal of Research in Engineering and Technology* **2015**, *04*, 211–216, doi:10.15623/ijret.2015.0404038.
67. Humelnicu, C.; Mereuta, E.; Amortila, V.; Gingarasu, M.; Novetschi, M. Reduction of Polymeric Waste by Applying Heat Treatments during the Polymerization Period.; 2020; Vol. 2020-August, pp. 475–482.
68. Sosnovskiy, L.A.; Sherbakov, S.S. Vibro-Impact in Rolling Contact. *Journal of Sound and Vibration* **2007**, *308*, 489–503, doi:10.1016/j.jsv.2007.04.031.
69. Sosnovskii, L.A.; Komissarov, V.V.; Shcherbakov, S.S. Comparative Experimental Study of Friction Parameters in a Tribopair and a Force System. *J. Frict. Wear* **2012**, *33*, 203–207, doi:10.3103/S1068366612030105.
70. Sosnovskiy, L.A.; Bogdanovich, A.V.; Yelovoy, O.M.; Tyurin, S.A.; Komissarov, V.V.; Sherbakov, S.S. Methods and Main Results of Tribo-Fatigue Tests. *International Journal of Fatigue* **2014**, *66*, 207–219, doi:10.1016/j.ijfatigue.2014.04.006.
71. Radhakrishnan, V.M. Cumulative Damage in Low-Cycle Fatigue. *Experimental Mechanics* **1978**, *18*, 292–296, doi:10.1007/BF02324159.
72. Sosnovskii, L.A.; Komissarov, V.V.; Shcherbakov, S.S. A Method of Experimental Study of Friction in a Active System. *J. Frict. Wear* **2012**, *33*, 136–145, doi:10.3103/S1068366612020110.
73. Myshkin, N.; Kovalev, A. Adhesion and Friction of Polymers. *Polymer Tribology* **2009**, doi:10.1142/9781848162044_0001.
74. Curtu, I.; Stanciu, A.-E. Determinarea caracteristicilor mecanice ale epruvetelor realizate din material compozit de tip MAT&ROVING. *Buletinul AGIR* **2011**, *6*.
75. Billoët, J.-L. *Introduction aux matériaux composites à hautes performances*; Teknea, 1993; ISBN 978-2-87717-035-2.
76. Spanu, C.; Ciortan, S.; Bria, V.; Roman, I. The Behaviour of Some Additivated Composite Materials at Sliding Indentation Test. *12th International Conference on Tribology* **2011**, *12*, 4.
77. Ungureanu, V.; Roman, I.; Bria, V.; Birsan, I.-G.; CIRCUMARU, A. Tribological Comparison of Some Particulate Composites. *SERBIATRIB '11* **2011**, *12th International Conference on Tribology*, 4.

78. Productdefs - Epoxy Technology Inc. Available online: <https://www.epotek.com/site/technical-material/productdefs.html> (accessed on 25 March 2020).
79. Wang, Z.; Zhou, J.; Song, L.; Li, L. Experimental Study of Low Cycle Fatigue Properties for Epoxy Resins with Dibutyl Phthalate (Dbp). *Archives of Civil Engineering* **2018**, *64*, 147–159, doi:10.2478/ace-2018-0021.
80. Nagasawa, M.; Kinuhata, H.; Koizuka, H.; Miyamoto, K.; Tanaka, T.; Kishimoto, H.; Koike, T. Mechanical Fatigue of Epoxy Resin. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* **1995**, *30*, 1266–1272, doi:10.1007/BF00356129.
81. Humelnicu, C.; Mereuta, E.; Amortila, V.; Gingarasu, M. Fatigue Polymeric Materials - Air Pollution Factor. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM* **2019**, *19*, 221–228.
82. Munteniță, C. Studii privind proprietățile sistemelor epoxidice modificate cu nano-ferite. Teza de doctorat, Dunarea de Jos Galti: Galati, 2016.
83. Song, H.-J.; Zhang, Z.-Z.; Men, X.-H. Tribological Behavior of Polyurethane-Based Composite Coating Reinforced with TiO₂ Nanotubes. *European Polymer Journal* **2008**, *44*, 1012–1022, doi:10.1016/j.eurpolymj.2008.02.004.
84. Tianchi, W.; Dangsheng, X.; Tianle, Z. Preparation and Wear Behavior of Carbon/Epoxy Resin Composites with an Interpenetrating Network Structure Derived from Natural Sponge. *Carbon* **2010**, *48*, 2435–2441, doi:10.1016/j.carbon.2010.03.011.
85. Suresha, B.; Chandramohan, G.; Prakash, J.N.; Balusamy, V.; Sankaranarayananasamy, K. The Role of Fillers on Friction and Slide Wear Characteristics in Glass-Epoxy Composite Systems. *JMMCE* **2006**, *05*, 87–101, doi:10.4236/jmmce.2006.51006.
86. Friedrich, K. *Advances in Composite Tribology*; Elsevier, 1993; ISBN 978-0-444-89079-5.
87. Friedrich, K.; Schlarb, A.K. *Tribology of Polymeric Nanocomposites: Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings*; Elsevier, 2011; ISBN 978-0-08-055908-7.
88. Zhang, H.; Zhang, Z.; Friedrich, K. Effect of Fiber Length on the Wear Resistance of Short Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Composites Science and Technology* **2007**, *67*, 222–230, doi:10.1016/j.compscitech.2006.08.001.
89. Stachowiak, G.; Batchelor, A. *Engineering Tribology*; Elsevier, 2006; ISBN 978-0-7506-7836-0.
90. Friedrich, K.; Zhang, Z.; Schlarb, A.K. Effects of Various Fillers on the Sliding Wear of Polymer Composites. *Composites Science and Technology* **2005**, *65*, 2329–2343, doi:10.1016/j.compscitech.2005.05.028.
91. Lavielle, L. Polymer-Polymer Friction: Relation to Adhesion. *Wear* **1991**, *151*, 63–75, doi:10.1016/0043-1648(91)90346-V.
92. Roman, I. Contribuții la studiul proprietăților mecano-tribologice ale unor compozite polimerice epoxidice. Teza de doctorat, Dunarea de Jos Galti: Galati, 2012.
93. Humelnicu, C.; Ciortan, S.; Amortila, V. Artificial Neural Network-Based Analysis of the Tribological Behavior of Vegetable Oil-Diesel Fuel Mixtures. *Lubricants* **2019**, *7*, 32, doi:10.3390/lubricants7040032.
94. Humelnicu, C.; Amortila, V.; Mereuta, E. Neural Networks as Optimization Tools for Fuel Consumption.; International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Bulgaria, 2018; Vol. 18, pp. 531–537.
95. Haykin, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*; second.; Pearson Education: India, 1994; ISBN 81-7808-300-0.
96. Vassilopoulos, A.P. *Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures*; 2nd ed.; Woodhead Publishing, 2019; ISBN 978-0-08-102576-5.
97. Parikh, H.H.; Gohil, P.P. 13 - Experimental determination of tribo behavior of fiber-reinforced composites and its prediction with artificial neural networks. In *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*; Jawaid, M., Thariq, M., Saba, N., Eds.; Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering; Woodhead Publishing, 2019; pp. 301–320 ISBN 978-0-08-102290-0.

98. Sharma, A.; Anand Kumar, S.; Kushvaha, V. Effect of Aspect Ratio on Dynamic Fracture Toughness of Particulate Polymer Composite Using Artificial Neural Network. *Engineering Fracture Mechanics* **2020**, *228*, 106907, doi:10.1016/j.engfracmech.2020.106907.
99. Youshia, J.; Ali, M.E.; Lamprecht, A. Artificial Neural Network Based Particle Size Prediction of Polymeric Nanoparticles. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* **2017**, *119*, 333–342, doi:10.1016/j.ejpb.2017.06.030.
100. Yi, A.; Abdul Majid, M.S.; Mohd Nor, A.; Yaacob, S.; Ridzuan, M.J.M. First-Ply Failure Prediction of Glass/Epoxy Composite Pipes Using an Artificial Neural Network Model. *Composite Structures* **2018**, *200*, doi:10.1016/j.compstruct.2018.05.139.
101. Kranthi, G.; Satapathy, A. Evaluation and Prediction of Wear Response of Pine Wood Dust Filled Epoxy Composites Using Neural Computation. *Computational Materials Science* **2010**, *49*, 609–614, doi:10.1016/j.commatsci.2010.06.001.