

UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI



**CERCETĂRI PRIVIND FENOMENUL DE FRETTING.
CALITATE ȘI TRANSFER TEHNOLOGIC**

TEZĂ DE ABILITARE REZUMAT

Domeniul: Inginerie Industrială

prof. univ. dr. ing. Ștefan Sorinel GHIMIȘI

Petroșani, 2026

REZUMAT

CERCETĂRI PRIVIND FENOMENUL DE FRETTING. CALITATE ȘI TRANSFER TEHNOLOGIC

Teza de abilitare intitulată „*Cercetări privind fenomenul de fretting. Calitate și transfer tehnologic*”, elaborată în domeniul Inginerie Industrială, prezintă sinteza activității științifice desfășurate după obținerea titlului de doctor inginer, evidențiind contribuțiile originale în domeniul mecanicii contactului, al durabilității sistemelor mecanice și al integrării managementului calității în procese inginerești și aplicații industriale.

Nucleul cercetării îl constituie investigarea fenomenului de fretting, proces complex de deteriorare ce apare în contactele mecanice supuse solicitărilor ciclice și micro-alunecărilor relative. Importanța acestui fenomen derivă din impactul major asupra fiabilității și siguranței echipamentelor industriale, fiind frecvent întâlnit în industria energetică, extractivă, aeronautică și în construcția de mașini.

Contribuțiile științifice originale includ dezvoltarea unui cadru analitic riguros pentru determinarea câmpului tensiunilor și deformațiilor într-un contact de tip sferă–plan supus încărcărilor normale și tangențiale combinate, specific fenomenului de fretting. Analiza a fost fundamentată pe utilizarea soluțiilor clasice ale semispațiului elastic (Boussinesq–Cerutti), extinse prin aplicarea funcțiilor Green pentru distribuții de presiune variabile și solicitări tangente distribuite. Această abordare a permis determinarea explicită a tensiunilor principale, a tensiunii echivalente și a distribuției presiunilor atât în interiorul, cât și în exteriorul zonei de contact.

Un element de originalitate îl constituie adimensionalizarea relațiilor obținute, prin introducerea unor parametri caracteristici (raportul dintre sarcina tangențială și cea normală, coeficientul de frecare, raza de contact, modulul de elasticitate redus). Această formulare adimensională a permis generalizarea rezultatelor pentru o gamă largă de condiții de încărcare și materiale, facilitând compararea directă a diferitelor regimuri de contact și identificarea pragurilor critice de tranziție între comportarea elastică și cea plastică.

Analiza distribuției tensiunilor a evidențiat influența semnificativă a coeficientului de frecare asupra poziției și valorii maxime a tensiunilor principale și a tensiunii echivalente Von Mises. S-a demonstrat că, pe măsură ce coeficientul de frecare crește, zona de concentrare a tensiunilor se deplasează către marginea contactului, unde apar valori maxime ale tensiunii tangențiale și ale tensiunii echivalente. Această zonă a fost identificată ca fiind critică pentru inițierea fisurilor de oboseală în fretting, în concordanță cu observațiile experimentale privind apariția microfisurilor sub-suprafață.

Pentru evaluarea probabilității de apariție a deteriorării au fost aplicate criterii moderne de rezistență, în special criteriul Von Mises pentru analiza plasticității și criterii de oboseală bazate pe amplitudinea tensiunilor ciclice și pe energia disipată în contact. A fost analizată dependența acestor criterii de parametrii geometrici (raza de curbură, dimensiunea zonei de contact) și mecanici (modulul de elasticitate, coeficientul de frecare, nivelul sarcinii normale și tangențiale). Rezultatele au evidențiat existența unui domeniu critic al parametrilor în care se produce tranziția de la comportarea elastică la cea elasto-plastică, asociată cu acumularea progresivă a deteriorării.

Un aport important îl constituie analiza concentratorilor de tensiune generați la marginea contactului și rolul acestora în inițierea procesului de fretting fatigue. A fost demonstrat că distribuția neuniformă a tensiunilor tangențiale conduce la apariția unor gradienti ridicai de tensiune, favorizând nucleerea microfisurilor la adâncimi reduse sub suprafața de contact.

Modelarea teoretică a fost extinsă prin dezvoltarea unui model elasto-plastic al contactului de fretting, capabil să descrie evoluția stării de tensiuni în condiții de solicitare ciclică și să integreze efectele deformării plastice locale. Modelul permite descrierea redistribuirii presiunilor în zona de contact și apariția celui de-al treilea corp rezultat din particulele de uzură. Prin integrarea comportării plastice în analiza contactului, s-a obținut o descriere mai realistă a evoluției deteriorării și a tranziției dintre regimurile de uzură și oboseală.

Rezultatele analitice au fost corelate cu simulări numerice realizate prin metoda elementelor finite, utilizând modelele tridimensionale ale contactului sferă-plan, precum și cu investigații experimentale efectuate pe standuri dedicate studiului fretting-ului. Corelarea dintre rezultatele teoretice, numerice și experimentale a permis validarea modelelor dezvoltate și identificarea mecanismelor dominante de deteriorare, contribuind la formularea unor criterii predictive pentru evaluarea duratei de viață a componentelor mecanice supuse fenomenului de fretting.

Prin această abordare integrată — analitică, numerică și experimentală — au fost obținute rezultate care extind cadrul clasic al mecanicii contactului și oferă instrumente teoretice și aplicative pentru analiza și prevenirea deteriorării prin fretting în sisteme mecanice industriale.

O a doua direcție majoră a cercetării vizează creșterea durabilității și fiabilității sistemelor mecanice industriale, prin dezvoltarea unor metode integrate de analiză, evaluare și optimizare a comportării în exploatare a componentelor supuse solicitărilor complexe. Această direcție are la bază corelarea mecanicii materialelor, a analizei tensiunilor și a criteriilor de deteriorare cu metode numerice avansate și validări experimentale.

În acest context au fost elaborate metodologii de evaluare a stării de degradare bazate pe analiza câmpurilor de tensiuni și pe aplicarea criteriilor de rezistență și oboseală. Abordarea propusă presupune determinarea distribuției tensiunilor principale și a tensiunii echivalente în zonele critice ale componentelor, identificarea concentratorilor de tensiune și evaluarea gradului de apropiere față de limitele de plasticitate sau de oboseală. Au fost analizate atât regimurile de solicitare statică, cât și cele ciclice, punându-se accent pe acumularea deteriorării în timp și pe mecanismele de inițiere a fisurilor.

Pentru componentele supuse solicitărilor ciclice au fost dezvoltate modele predictive pentru estimarea duratei de viață, fundamentate pe corelarea amplitudinii tensiunilor cu curbele caracteristice de oboseală ale materialelor. Au fost integrate abordări deterministe și probabilistice, în vederea estimării duratei de viață rămase și a evaluării riscului de defectare. Modelele dezvoltate permit cuantificarea influenței parametrilor geometrici, a condițiilor de încărcare și a proprietăților materialelor asupra fiabilității globale a sistemului mecanic.

Un rol esențial în dezvoltarea acestei direcții l-a avut utilizarea simulării numerice prin metoda elementelor finite (FEM). Au fost realizate modele tridimensionale ale componentelor industriale, care au permis:

- analiza distribuției tensiunilor în zonele cu variații geometrice;
- evaluarea efectului concentratorilor de tensiune generați de discontinuități, racordări sau asamblări;
- simularea regimurilor de solicitare ciclică și a efectelor cumulării tensiunilor;
- analiza comportării în condiții limită.

Prin utilizarea simulării numerice au fost identificate zonele critice susceptibile la inițierea deteriorării, iar pe baza rezultatelor obținute au fost propuse soluții de optimizare constructivă. Aceste soluții au inclus modificarea geometriei locale pentru reducerea concentratorilor de tensiune, optimizarea dimensiunilor și alegerea unor materiale cu comportare superioară la solicitări ciclice.

De asemenea, simularea numerică a permis evaluarea influenței parametrilor tehnologici asupra performanței în exploatare, facilitând optimizarea proceselor de fabricație și reducerea defectelor structurale. Integrarea analizelor numerice în faza de proiectare a contribuit la

dezvoltarea conceptului de „design orientat către fiabilitate”, prin anticiparea zonelor critice înainte de realizarea fizică a componentelor.

Rezultatele obținute au demonstrat că reducerea concentratorilor de tensiune și optimizarea distribuției eforturilor conduc la creșterea durabilității și la îmbunătățirea performanțelor în exploatare ale sistemelor mecanice industriale. În aplicații specifice din industria energetică și extractivă, metodele dezvoltate au permis fundamentarea unor decizii tehnice privind modernizarea și exploatarea echipamentelor, contribuind la reducerea riscului de avarii și la creșterea siguranței operaționale.

Prin abordarea integrată — analiză teoretică, modelare numerică și aplicații industriale — această direcție de cercetare a condus la dezvoltarea unor instrumente metodologice utile pentru evaluarea și optimizarea fiabilității sistemelor mecanice, consolidând profilul științific în domeniul durabilității și comportării în exploatare a echipamentelor industriale.

În domeniul managementului calității, cercetările au vizat integrarea instrumentelor moderne de asigurare, control și îmbunătățire continuă a calității în cadrul proiectelor ingineresti și al aplicațiilor industriale, în concordanță cu cerințele actuale privind performanța, trasabilitatea și sustenabilitatea proceselor. Abordarea adoptată a avut ca obiectiv corelarea dimensiunii tehnice a produselor și proceselor cu indicatorii de performanță specifici sistemelor de management al calității.

Au fost dezvoltate metodologii pentru aplicarea instrumentelor statistice de control al proceselor (SPC), analiza capabilității proceselor și utilizarea metodelor de analiză a cauzelor fundamentale ale neconformităților. Integrarea acestor instrumente în proiecte ingineresti a permis monitorizarea și reducerea variabilității proceselor tehnologice, optimizarea parametrilor de fabricație și creșterea stabilității proceselor industriale.

Un accent deosebit a fost pus pe corelarea indicatorilor tehnici (toleranțe dimensionale, distribuții ale tensiunilor, parametri funcționali) cu indicatorii de performanță ai proceselor (rată de defectare, cost al non-calității, eficiență operațională). Prin această abordare integrată, s-a realizat o legătură directă între analiza inginerescă și managementul calității, contribuind la fundamentarea deciziilor tehnice pe baze cuantificabile.

În paralel, cercetările au vizat dezvoltarea infrastructurii educaționale și experimentale necesare formării specialiștilor în domeniul Ingineriei Industriale. Au fost modernizate laboratoare didactice și de cercetare, au fost introduse aplicații software pentru simulare și analiză statistică, iar activitățile practice au fost corelate cu probleme reale din industrie. Această infrastructură a permis integrarea conceptelor de Quality Management, fiabilitate și optimizare a proceselor în activitatea de formare universitară și doctorală.

Lucrarea evidențiază contribuții interdisciplinare în domeniul ingineriei industriale, sustenabilității și securității ocupaționale, structurate pe două direcții principale: dezvoltarea mecanismelor generatoare de curbe estetice și inovarea în reducerea noxelor și impactului asupra mediului.

O direcție de cercetare vizează dezvoltarea unor mecanisme capabile să genereze forme geometrice estetice, având ca model „Floarea Vieții”, un simbol geometric cu semnificații istorice și matematice profunde. Studiul propune două mecanisme originale — unul bazat pe mecanismul Geneva și altul pe roți dințate cu profil compus — capabile să reproducă această structură prin sinteză cinematică și analiză cu bucle închise. Integrarea programării a permis validarea traiectoriilor generate, demonstrând potențialul acestor mecanisme în aplicații industriale și de design (textile, arhitectură, design industrial). Cercetarea contribuie la conturarea unui nou subdomeniu în teoria mecanismelor: generarea curbelor estetice.

În paralel, sunt analizate mecanisme inspirate din biologie, în special cele de prehensiune și deplasare, cu aplicații în robotică. Studiile asupra biomecanicii păsărilor evidențiază soluții eficiente pentru prindere și stabilitate, bazate pe adaptabilitate geometrică și optimizarea

consumului energetic. Modelele mecanice echivalente dezvoltate oferă perspective relevante pentru proiectarea roboților capabili să opereze în medii complexe.

A altă direcție de cercetare abordează sustenabilitatea industrială prin prisma managementului verde al lanțului de aprovizionare (GSCM) și inovării verzi (GI). Pe baza unei meta-analize a studiilor recente, se demonstrează că practicile GSCM contribuie semnificativ la îmbunătățirea performanței de mediu și la atingerea neutralității carbonului, efectele fiind influențate de contextul economic și instituțional. Integrarea perspectivelor Resource-Based View (RBV) și Natural Resource-Based View (NRBV) evidențiază rolul strategic al capabilităților de mediu în obținerea avantajului competitiv sustenabil.

Un alt aspect important îl constituie evaluarea riscurilor chimice în procese industriale, în special în sudură. Analizele experimentale indică depășiri ale limitelor admise pentru anumite tipuri de emisii, confirmând existența unui risc chimic ridicat și necesitatea implementării unor măsuri preventive riguroase. Metodologiile utilizate includ inventarierea substanțelor, ierarhizarea riscurilor și evaluarea impactului asupra mediului. În cazul sudării manuale cu arc electric cu electrod învelit, rezultatele arată că, în condiții controlate, emisiile pot fi menținute sub limitele admise.

În ansamblu, cercetările prezentate contribuie la dezvoltarea unor soluții inovatoare în inginerie, prin îmbinarea esteticii cu funcționalitatea, integrarea principiilor bio-inspirate și promovarea sustenabilității și securității în mediul industrial.

Activitatea de transfer tehnologic este reflectată prin participarea activă la proiecte de cercetare naționale și internaționale, precum și prin derularea de contracte de cercetare aplicativă cu operatori economici. Aceste proiecte au avut ca obiectiv rezolvarea unor probleme concrete legate de durabilitatea echipamentelor, optimizarea proceselor tehnologice, reducerea defectărilor și îmbunătățirea performanței operaționale.

Implementarea rezultatelor cercetării în mediul industrial a presupus validarea soluțiilor tehnice în condiții reale de exploatare, elaborarea de metodologii aplicative și formularea de recomandări tehnice pentru modernizarea echipamentelor. Prin aceste activități, cercetarea fundamentală privind mecanica contactului, fiabilitatea și optimizarea proceselor a fost transpusă în soluții tehnologice concrete, cu impact direct asupra performanței economice a partenerilor industriali.

Această dimensiune aplicativă evidențiază capacitatea de a integra cercetarea teoretică și numerică în proiecte cu relevanță practică, demonstrând competența de a genera soluții inovative adaptate cerințelor industriei. În același timp, colaborarea constantă cu mediul economic a contribuit la consolidarea relației universitate–industrie și la creșterea vizibilității și impactului activității științifice.

Prin corelarea managementului calității cu cercetarea inginerească și prin valorificarea rezultatelor în aplicații industriale, s-a conturat o abordare integrată care susține atât performanța tehnică, cât și competitivitatea economică, consolidând profilul academic în domeniul Ingineriei Industriale.

Direcțiile viitoare de cercetare vor avea ca obiectiv consolidarea și extinderea cadrului teoretic și aplicativ dezvoltat, prin abordări multidisciplinare și utilizarea tehnologiilor avansate de modelare și monitorizare.

O direcție prioritară o constituie dezvoltarea unor modele tridimensionale avansate prin metoda elementelor finite pentru analiza contactelor de fretting în condiții reale de exploatare. Aceste modele vor integra contactul neliniar, frecarea dependentă de presiune și de viteza relativă, precum și evoluția progresivă a deteriorării. Se va urmări modelarea explicită a regimurilor de alunecare parțială și totală, a redistribuirii tensiunilor în condiții ciclice și a influenței microgeometriei suprafețelor asupra comportării globale a contactului. Implementarea unor modele tridimensionale va permite analizarea detaliată a distribuției

tensiunilor în volum, identificarea zonelor sub-suprafață susceptibile la inițierea fisurilor și evaluarea efectelor parametrilor geometrici și mecanici asupra durabilității.

În paralel, se va urmări integrarea comportării elasto-plastic-viscoplastice a materialelor în cadrul modelelor numerice. Această abordare va permite descrierea realistă a fenomenelor de ecrusare, relaxare a tensiunilor și acumulare progresivă a deformațiilor plastice sub solicitări ciclice. Modelarea viscoplasticității va fi esențială pentru analiza componentelor care funcționează la temperaturi ridicate sau în regimuri de solicitare complexă, unde efectele dependente de timp devin semnificative. Integrarea acestor modele constitutive va contribui la creșterea acurateței predicțiilor privind tranziția dintre regimurile de uzură, oboseală și deformare plastică severă.

O altă direcție majoră vizează dezvoltarea unor modele probabilistice pentru estimarea duratei de viață a componentelor mecanice. În acest sens, se va urmări integrarea variabilității proprietăților materialelor, a condițiilor de încărcare și a parametrilor de contact într-un cadru de analiză statistică a fiabilității. Utilizarea metodelor probabilistice (analiza distribuțiilor Weibull, metode Monte Carlo, modele bazate pe hazard) va permite evaluarea riscului de defectare și determinarea duratei de viață rămase în condiții de incertitudine. Această abordare va facilita trecerea de la evaluarea deterministă a durabilității la una orientată pe risc, cu aplicabilitate directă în mentenanța industrială.

În concordanță cu tendințele actuale ale digitalizării industriale, cercetările viitoare vor integra tehnologiile specifice Industry 4.0 în monitorizarea și mentenanța predictivă a sistemelor mecanice. Se va urmări utilizarea senzorilor inteligenți pentru monitorizarea vibrațiilor, temperaturii și parametrilor de funcționare, dezvoltarea unor modele digitale de tip „digital twin” pentru simularea comportării în timp real și implementarea algoritmilor de analiză predictivă pentru anticiparea defectărilor. Corelarea datelor experimentale obținute în exploatare cu modelele numerice dezvoltate va permite optimizarea strategiilor de mentenanță și reducerea timpilor de nefuncționare.

Prin integrarea modelării tridimensionale avansate, a comportării neliniare a materialelor, a analizelor probabilistice și a tehnologiilor digitale, direcțiile viitoare de cercetare vor contribui la dezvoltarea unui cadru științific modern pentru evaluarea și optimizarea durabilității sistemelor mecanice.

În ansamblu, contribuțiile teoretice, numerice și experimentale prezentate în teză evidențiază maturitatea științifică dobândită, capacitatea de a aborda probleme complexe din domeniul Ingineriei Industriale și competența de a dezvolta și coordona activități de cercetare avansată. Totodată, acestea demonstrează potențialul de formare și consolidare a unei școli doctorale orientate spre durabilitatea, fiabilitatea și comportarea în exploatare a sistemelor mecanice, în concordanță cu exigențele actuale ale cercetării științifice și ale mediului industrial.

Ultimul capitolul din teza de abilitare conturează un program strategic de dezvoltare a activității științifice în domeniul Ingineriei Industriale, fundamentat pe experiența acumulată în cercetare și pe rezultatele obținute în domenii precum fretting-ul, durabilitatea sistemelor mecanice, managementul calității și transferul tehnologic. Direcțiile propuse urmăresc atât consolidarea unei direcții proprii de cercetare, cât și dezvoltarea unei școli doctorale competitive, cu impact asupra vizibilității academice și a colaborării universitate–industrie.

O primă direcție majoră vizează aprofundarea cercetărilor fundamentale și aplicative privind fenomenul de fretting, considerat un mecanism complex de deteriorare cu efecte importante asupra duratei de viață și siguranței componentelor mecanice. Sunt propuse dezvoltarea de modele numerice tridimensionale, modele elasto-plastic-viscoplastice, criterii predictive pentru estimarea duratei de viață, precum și studii privind inițierea și propagarea fisurilor. Aceste cercetări vor fi completate prin analize parametrice, soluții constructive pentru reducerea fretting-ului și validări experimentale, cu aplicabilitate directă în industriile energetică și minieră.

A doua axă strategică este dedicată creşterii durabilităţii şi fiabilităţii sistemelor mecanice, prin dezvoltarea unor metode moderne de evaluare a degradării, a unor modele predictive pentru durata de viaţă şi a unor instrumente bazate pe simulare numerică. Totodată, sunt avute în vedere soluţii tehnologice de creştere a durabilităţii şi implementarea conceptelor de mentenanţă predictivă, în scopul reducerii costurilor de exploatare şi al creşterii siguranţei în funcţionare.

O altă direcţie importantă priveşte dezvoltarea cercetărilor în domeniul managementului calităţii şi al dezvoltării produselor industriale. Se propune trecerea către sisteme integrate şi inteligente de management al calităţii, prin corelarea standardelor internaţionale cu managementul riscului, al proceselor, al mediului şi al securităţii ocupaţionale. În acest context, digitalizarea joacă un rol esenţial, fiind vizate concepte precum Quality 4.0, trasabilitatea digitală, utilizarea inteligenţei artificiale, a senzorilor inteligenţi şi a sistemelor cyber-fizice. Sunt incluse, de asemenea, direcţii privind optimizarea proceselor tehnologice, creşterea fiabilităţii produselor şi dezvoltarea de produse inovative, sustenabile şi performante.

Capitolul acordă o importanţă deosebită transferului tehnologic şi colaborării cu mediul economic, considerate esenţiale pentru valorificarea practică a rezultatelor cercetării. În acest sens, se urmăreşte dezvoltarea de parteneriate durabile cu operatori economici, realizarea de contracte de cercetare aplicativă, dezvoltarea unor produse şi tehnologii inovative, implementarea rezultatelor în industrie şi, pe termen mediu şi lung, constituirea unui centru de cercetare şi transfer tehnologic în cadrul universităţii.

Un obiectiv strategic central îl reprezintă consolidarea unei direcţii proprii de cercetare şi formarea unei resurse umane înalt calificate. Aceasta presupune atragerea şi coordonarea doctoranzilor, implicarea studenţilor şi masteranzilor în activităţi de cercetare, dezvoltarea infrastructurii experimentale şi numerice, participarea la proiecte naţionale şi internaţionale şi publicarea rezultatelor în reviste de prestigiu. Se urmăreşte astfel formarea unei şcoli de cercetare în domeniul fretting-ului şi al durabilităţii sistemelor mecanice, cu recunoaştere naţională şi internaţională.

În concordanţă cu aceste direcţii, sunt propuse trei axe de cercetare doctorală: studiul fenomenului de fretting şi al durabilităţii sistemelor mecanice, fiabilitatea şi mentenanţa sistemelor industriale, respectiv managementul calităţii şi dezvoltarea produselor industriale.

În ansamblu, capitolul propune o viziune coerentă, modernă şi sustenabilă asupra evoluţiei carierei ştiinţifice, bazată pe integrarea cercetării fundamentale cu cea aplicativă, pe conectarea la tendinţele Industry 4.0 şi pe consolidarea relaţiei dintre universitate şi mediul socio-economic. Implementarea acestor direcţii este menită să contribuie la afirmarea unui profil ştiinţific distinct şi la creşterea prestigiului academic al Universităţii Constantin Brâncuşi din Târgu Jiu.

Experienţa acumulată în cei peste 30 de ani de activitate academică şi de cercetare în cadrul domeniilor de cercetare în care am activat a fost valorificată prin publicarea de articole ştiinţifice, proiecte, contracte. Această experienţă va fi continuată şi pe viitor pe noi direcţii de cercetare pe care autorul le-a prezentat la finalul tezei de abilitare.