

UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA
Facultatea de Inginerie Hunedoara
Departamentul de Inginerie și Management

TEZĂ DE ABILITARE

Conf.dr.ing. PINCA-BRETOTEAN CAMELIA

**HUNEDOARA
2022**

UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA
Facultatea de Inginerie Hunedoara
Departamentul de Inginerie și Management

COMPORTAREA MATERIALELOR METALICE ȘI COMPOZITE LA SOLICITĂRI MECANO-TERMICE

TEZĂ DE ABILITARE

Conf.dr.ing. PINCA-BRETOTEAN CAMELIA

**HUNEDOARA
2022**

CUPRINS

	Pag.
Rezumat	4
Abstract	9
Partea I Realizări științifice profesionale și academice	14
Capitolul 1. Sinteza rezultatelor științifice, profesionale și academice	14
1.1 Introducere.....	14
1.2 Tematica abordată.....	14
1.3 Elemente definitorii ale activității didactice.....	15
1.4 Elemente definitorii ale activității de cercetare științifică.....	17
1.5 Vizibilitatea și impactul activității desfășurate.....	21
Capitolul 2. Comportarea materialelor destinate fabricării cilindrilor de laminare la cald sub acțiunea solicitărilor din exploatare	22
2.1 Preliminarii.....	22
2.2 Analiza cauzelor care duc la ruperea cilindrilor de laminare la cald.....	23
2.3 Distribuția câmpurilor de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor de laminare la cald.....	26
2.4 Concluzii.....	31
Capitolul 3. Studiul regimului termic al cilindrilor de laminare la cald	33
3.1 Importanța studiului regimului termic al cilindrilor de laminare la cald	33
3.2 Studiul în laborator a regimului termic a cilindrilor de laminare la cald.....	32
3.2.1 Prezentarea instalațiilor experimentale.....	33
3.2.1.1 Laminorul degrositor experimental.....	34
3.2.1.2 Instalația pentru determinarea variațiilor de temperaturi prin oscilografiera procesului de laminare.....	35
3.2.1.3 Instalația pentru determinarea variațiilor de temperaturi utilizând module analogice și tehnica electronică de calcul.	37
3.2.1.4 Instalația pentru determinarea forțelor de laminare.....	38
3.2.2 Operații pregătitoare în vederea laminării experimentale.....	39
3.3 Determinări experimentale ale variațiilor de temperaturi prin oscilografiera procesului de laminare.....	40
3.4 Determinări experimentale ale variațiilor de temperaturi utilizând module analogice și tehnica electronică de calcul.....	43
3.5 Modelarea matematică a curbelor variațiilor de temperaturi.....	47
3.6 Concluzii.....	48
Capitolul 4. Determinarea tensiunilor din cilindrii de laminare la cald	49
4.1 Elemente ale calculului de rezistență al cilindrilor de laminare la cald....	48
4.2 Calculul tensiunilor mecanice.....	49
4.3 Calculul tensiunilor termice.....	52
4.3.1 Determinarea tensiunilor termice simetrice.....	53
4.3.2 Determinarea tensiunilor termice asimetrice.....	57
4.4 Determinarea tensiunilor echivalente.....	60
4.5 Optimizarea tensiunilor din cilindrii de laminare la cald.....	64
4.6 Concluzii.....	65

Capitolul 5.	Determinarea rezistenței la oboseală termică a cilindrilor de laminare la cald.....	66
5.1	Importanța determinării rezistenței la oboseală termică.....	65
5.2	Prezentarea instalației experimentale pentru determinarea rezistenței la oboseală termică.....	66
5.2.1	Construcția instalației	66
5.2.2	Prezentarea instalației pentru încălzirea probelor.....	67
5.3	Alegerea mărcilor de oțeluri și fonte supuse experimentărilor.....	68
5.4	Prezentarea probelor experimentale.....	69
5.5	Regimurile de solicitare termică pentru determinarea rezistenței la oboseală termică.....	70
5.6	Efectuarea experimentărilor.....	70
5.6.1	Înregistrarea parametrilor experimentali la fiecare regim de solicitare.....	71
5.6.2	Urmărirea apariției fisurilor specifice fenomenului de oboseală termică.....	73
5.7	Evaluarea rezultatelor obținute în laborator comparativ cu cele industriale.....	75
5.8	Propuneri de materiale pentru fabricarea cilindrilor de laminare la cald.....	77
5.9	Parametri șocului termic.....	79
5.10	Concluzii.....	81
Capitolul 6.	Evaluarea rezistenței la oboseală termică a organelor de mașini fixe și mobile din componența motoarelor cu ardere internă.....	83
6.1	Importanța studiului oboselii termice la motoarele cu ardere internă....	83
6.2	Metode de evaluare a oboselii termice în condiții de laborator.....	84
6.3	Prezentarea instalației experimentale.....	85
6.4	Validarea instalației experimentale.....	93
6.5	Concluzii.....	94
Capitolul 7.	Studiul comportării materialelor compozite ecologice destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehicule.....	96
7.1	Argumentarea direcției abordate în cercetare.....	96
7.2	Materiale destinate realizării plăcuțelor de frână.....	98
7.3	Producerea, caracterizare și testarea materialelor de fricțiune cu fibră de nucă de cocos.....	99
7.3.1	Materiale și tehnologie.....	99
7.3.2	Caracteristici fizico-mecanice și tribologice.....	100
7.3.3	Testarea în laborator a materialului de fricțiune.....	107
7.3.4	Testarea plăcuțelor de frână produse în laborator într-o stație ITP.	110
7.4	Producerea și caracterizarea materialului de fricțiune pe bază de scoici.	113
7.4.1	Materiale și tehnologie.....	114
7.4.2	Caracteristici fizico-mecanice și tribologice.....	115
7.5	Concluzii și direcții viitoare de cercetare.....	120
Partea II	Perspective de evoluție și dezvoltare a carierei profesionale, științifice și academice.....	121
Bibliografie	Referințe bibliografice generale și proprii.....	122

REZUMAT

Teza de abilitare cu titlul **“COMPORTAREA MATERIALELOR METALICE ȘI COMPOZITE LA SOLICITĂRILE MECANO-TERMICE”** reprezintă o sinteză a preocupărilor și a activității științifice în perioada ce a urmat susținerii tezei de doctorat din anul 2002, în cadrul Universității POLITEHNICA Timișoara, cu titlul *“Optimizarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice”*, sub îndrumarea Prof.univ.dr.Eur.Ing. Tiberiu Dimitrie Babeu, când am obținut titlul de doctor în domeniul **Inginerie Mecanică**.

Deși o parte din cercetările post-doctorale au rămas în domeniul utilajului metalurgic, abordarea acestora are un caracter multidisciplinar, solicitând cunoștințe din următoarele domenii: Inginerie mecanică, Știința materialelor, Matematică și Informatică.

Prezentarea cercetărilor derulate până în prezent reflectă experiența acumulată prin activitatea didactică și de cercetare desfășurată pe parcursul a 28 de ani în cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara, Universitatea POLITEHNICA Timișoara.

Realizările științifice și profesionale semnificative s-au derulat pe două direcții. Prima direcție se referă la creșterea durabilității cilindrilor de laminare, prin studiul comportării materialelor destinate realizării acestora (oțeluri și fonte) sub acțiunea solicitărilor mecanice și termice din exploatare. Cea de a doua direcție s-a concretizat în producerea, caracterizarea și testarea unor materiale compozite, realizate cu fibre organice, destinate plăcuțelor de frână pentru autovehiculele mici și performanțe medii. Cele două direcții de cercetare au fost corelate cu activitatea didactică desfășurată, în sensul că, pe de o parte am implicat studenții în activitatea de cercetare, iar pe de altă parte rezultatele științifice obținute au fost valorificate în procesul didactic.

În teza de abilitare sunt incluse cele mai importante rezultate obținute pe cele două direcții de cercetare abordate care s-au concretizat în: două contracte de cercetare științifică obținute prin competiție la nivel național ca director, o invenție înregistrată la OSIM, o monografie publicată într-o editură recunoscută CNCSIS, două aplicații informatice și 150 lucrări științifice, dintre care 22 Web of Science, 29 BDI (ISI Proceedings și Scopus), 31 în alte baze de date, iar celelalte în volumele unor manifestări științifice naționale și internaționale neindexate.

Calitatea cilindrilor de laminare influențează producția și nivelul calitativ al laminatelor. În exploatare, calitatea cilindrilor de laminare este apreciată prin duritate, rezistență și stabilitate la temperaturi ridicate. Aceste caracteristici determină rezistența mare la uzare precum și rezistența acestora la variații bruște de temperatură. Îndeplinirea acestor cerințe presupune, pe de o parte alegerea corectă a materialului și a tehnologiei de fabricație, iar pe de altă parte exploatarea lor corespunzătoare.

Cercetările efectuate în această direcție s-au derulat pe o perioadă de 15 ani fiind cuprinse sintetizat în cadrul acestei teze de abilitare și reprezintă o primă direcție de cercetare principală abordată în perioada post-doctorală. Tematica abordată pe această direcție include elemente de cercetare fundamentală, aplicativă la nivel de laborator și de nivel industrial.

Scopul cercetării abordate pe această direcție se referă la creșterea durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare la cald, prin evaluarea comportării acestora la solicitările mecanice și termice.

Obiectivele specifice urmate pe această direcție de cercetare se referă la:

- Analiza cauzelor care duc la ruperea cilindrilor de laminare la cald;
- Studiul teoretic al distribuției câmpurilor de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor în timpul procesului de laminare la cald;
- Concepția și realizarea instalației pentru determinarea variațiilor de temperaturi de pe suprafața și din stratul superficial al cilindrilor de laminare la cald și a instalației pentru determinarea forțelor de laminare, adaptate laminorului experimental;
- Experimentări în condiții de laborator în vederea cunoașterii regimului termic al cilindrilor de laminare la cald;

- Determinarea tensiunilor mecanice, termice, echivalente și optimizarea nivelului acestora;
- Studiul rezistenței la oboseală termică în vederea aprecierii durabilității cilindrilor de laminare la cald;
- Compararea rezultatelor obținute în laborator cu cele industriale;
- Propuneri de materiale cu rezistență ridicată la oboseală termică pentru fabricarea cilindrilor de laminare la cald;
- Studiul posibilităților de transpunere a experienței dobândite în domeniul oboselii termice a cilindrilor de laminare la cald la organele de mașini fixe și mobile din componența motoarelor cu ardere internă;
- Concepția, realizarea și validarea instalației pentru studiul rezistenței la oboseală termică a organelor de mașini supuse în exploatare acestui fenomen.

În vederea îndeplinirii acestor obiective a fost necesară o documentație temeinică în literatura de specialitate și o analiză detaliată a rapoartelor tehnice privind comportarea cilindrilor de laminare la cald în exploatare, în acest sens având la dispoziție datele din cadrul combinatului siderurgic hunedorean. Rezultatele obținute prin studiile efectuate la nivel de laborator au fost implementate și la nivel industrial.

Separarea câmpurilor de temperaturi care produc tensiunile termice în simetrice și asimetrice, confirmarea lor experimentală și transpunerea cercetărilor efectuate asupra rezistenței la oboseală termică a cilindrilor de laminare la cald la alte organe de mașini supuse acestui fenomen, prin conceperea și realizarea unei instalații adecvate în acest sens, constituie GRADUL DE ORIGINALITATE ȘI INOVARE al acestor cercetări.

Cea de a doua direcție de cercetare a apărut ca urmare a numirii mele în comisia de îndrumare a unui doctorand care în cadrul tezei a studiat materialele destinate sistemelor de frânare ale autovehiculelor. Ca urmare a implicării în activitatea de cercetare s-a deschis o nouă perspectivă cu privire la găsirea de materiale ecologice care să ofere performanțe superioare funcționării produselor. Principalul obiectiv al acestei direcții de cercetare este de a dezvolta materiale de fricțiune pentru plăcuțele de frână, pe bază de fibre naturale, capabile să reducă emisia de particule fine rezultate de la sistemele de frânare ale autovehiculelor. Testarea și aprecierea funcționalității acestora s-a realizat prin intermediul unei abordări multianalitice. Utilizarea diferitelor instrumente experimentale oferă o caracterizare completă a materiilor prime și a suprafețelor rezultate ca urmare a tehnologiei de fabricație. Fibrele organice alese sunt fibra de nucă de cocos și pulberea obținută din cochiliile scoicilor marine. Acestea sunt rezistente la uzură și pot fi combinate cu alte materiale fără efecte nefaste asupra mediului și a sănătății umane.

Obiectivele specifice urmate pe parcursul cercetării sunt:

- Studiul literaturii de specialitate cu privire la materialele compozite și tehnologiile de fabricație a acestora;
- Alegerea constituenților rețetelor și a parametrilor tehnologiei de sinterizare;
- Producerea în laborator a materialelor compozite cu fibră de nucă de cocos și pulbere din cochilii de scoici;
- Determinarea caracteristicilor fizico-mecanice și tribologice;
- Testarea materialelor produse în conformitate cu standardele în vigoare.

Cercetările efectuate pe această direcție nu oferă o aplicabilitate practică imediată, cauza fiind prețul materiei prime organice. Cu toate acestea, studiile efectuate au deschis noi direcții de cercetare care se referă la utilizarea altor tipuri de fibre organice, avantajoase din punct de vedere economic sau a unei combinații de fibre (în, rapiță, trestie) în producerea materialelor de fricțiune.

TEZA DE ABILITARE respectă structura impusă de normele CNADTCU în vigoare, incluzând două părți, structurate pe 7 capitole distincte și o bibliografie selectivă care cuprinde referințe bibliografice generale și proprii.

PARTEA I cuprinde șapte capitole.

CAPITOLUL 1: SINTEZA REZULTATELOR ȘTIINȚIFICE, DIDACTICE ȘI ACADEMICE

Această parte a tezei este dedicată prezentării celor mai relevante rezultate obținute pe parcursul carierei mele profesionale. În cadrul acestei secțiuni sunt conturate direcțiile abordate în activitatea

științifică, didactică și academică post-doctorală. În ceea ce privește activitatea didactică, se fac referiri la activitatea de predare, de îndrumare a lucrărilor de licență și disertație, la activitatea de modernizare și dotare a laboratoarelor cu material didactic și echipamente specifice, precum și la activitatea publicistică cu rol didactic care a constat în publicarea de cursuri și îndrumare de laborator utile studenților și masteranzilor. În activitatea didactică am abordat metode de predare-evaluare moderne care au avut la bază principiile asigurării calității în învățare. Activitatea de cercetare științifică s-a materializat prin două granturi ca director obținute prin competiție la nivel național, precum și cele la care am participat ca membru în echipa de cercetare, la activitatea de îndrumare a doctoranzilor și activitatea publicistică direcționată spre publicarea de cărți de specialitate și lucrări științifice. Activitatea de cercetare științifică vastă a facilitat transferul de cunoștințe studenților și m-a ajutat pentru a-mi perfecționa și înnoi continuu cunoștințele de specialitate și cele didactice. Această sinteză evidențiază direcțiile principale care constituie suportul dezvoltării personale, dar și contribuțiile aduse pentru dezvoltarea instituțională.

CAPITOLUL 2: COMPORTAREA MATERIALELOR DESTINATE FABRICĂRII CILINDRILOR DE LAMINARE LA CALD SUB ACȚIUNEA SOLICITĂRILOR DIN EXPLOATARE, sintetizează direcția principală de cercetare a autoarei. Acest capitol realizează o introducere succintă în domeniul de cercetare al cilindrilor de laminare la cald, marcând direcția în care urmează să se desfășoare cercetările. În acest scop s-a efectuat analiza cauzelor care duc la ruperea cilindrilor de laminare la cald în exploatare, materialele din care sunt fabricați cilindrii respectivi, studiul fiind efectuat pe baza datelor existente în cadrul combinatului siderurgic hunedorean. Concluziile rezultate din acest studiu arată că aproape jumătate dintre cilindri care s-au rupt în procesul de laminare, din perioada analizată, se datorează regimurilor termice necorespunzătoare la care aceștia sunt supuși în exploatare. Aceste regimuri au generat apariția fenomenului de oboseală termică, respectiv a șocurilor termice, motiv pentru care cercetările ulterioare s-au îndreptat în această direcție. Tot în acest capitol s-a analizat distribuția câmpurilor de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor de laminare la cald, pe baza literaturii de specialitate din domeniu. Concluziile obținute arată o separare a câmpurilor termice în simetrice și asimetrice, acestea fiind confirmate prin experimentările ulterioare.

CAPITOLUL 3: STUDIUL REGIMULUI TERMIC AL CILINDRILOR DE LAMINARE LA CALD, prezintă realizările din perioada post-doctorală cu privire la echipamentele prin intermediul cărora se determină variațiile de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor de laminare la cald, precum și determinarea experimentală a acestora, abordată în două variente: prin oscilografiera procesului de laminare și utilizând module analogice și tehnica electronică de calcul. În vederea analizei distribuției temperaturilor în cilindrii de laminare la cald a fost realizat un model matematic care confirmă datele obținute în experimentările efectuate. Cunoașterea variațiilor de temperaturi din cilindri de laminare la cald face posibilă cercetarea durabilității și a stabilității diverselor mărci de oțeluri și fonte din care aceștia sunt fabricați, acest lucru justificând cercetările efectuate în acest sens. De asemenea, studierea separată a câmpurilor de temperaturi simetrice și asimetrice ne permite să determinăm tensiunile termice produse de acestea, în contextul superpoziției efectelor tensiunilor care acționează în cilindri de laminare la cald.

CAPITOLUL 4: DETERMINAREA TENSIUNILOR DIN CILINDRII DE LAMINARE LA CALD, prezintă contribuțiile științifice și realizările cu privire la determinarea tensiunilor mecanice, termice și echivalente care apar în cilindri de laminare la cald. Aceste cercetări au fost realizate în cadrul grantului de cercetare obținut prin competiție la nivel național AT, Nr. GR/19.05.2006 cod CNCIS 45, Tema 3. Cercetările efectuate arată că tensiunile mecanice care solicită cilindri de laminare în exploatare, practic au valori nesemnificative. Tensiunile care duc la distrugerea calibrelor acestora sunt tensiunile termice produse de câmpurile asimetrice de temperaturi. Acestea au un caracter ciclic, se repetă la fiecare rotație a cilindrilor și sunt preponderent responsabile de producerea oboselii termice. În acest context, cercetarea tensiunilor termice care acționează în cilindrii de laminare este impetuos necesară nu numai pentru atenuarea fisurilor produse de oboseala termică, în scopul creșterii duratei de exploatare, ci și pentru evitarea șocurilor termice, deosebit de periculoase, care sunt produse de variațiile mari, instantanee de temperaturi care duc la forfecarea cordoanelor calibrelor cilindrilor în secțiunea lor maximă. La finalul capitolului s-a realizat o optimizare a tensiunilor echivalente, domeniu de optimizare

care permite formularea unor recomandări în vederea atenuării distrugerii calibrelor cilindrilor și evitarea rupei acestora prin șocuri termice.

CAPITOLUL 5: DETERMINAREA REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ TERMICĂ A CILINDRILOR DE LAMINARE LA CALD, prezintă principalele realizări științifice privind durabilitatea cilindrilor de laminare la cald prin evaluarea rezistenței la oboseală termică, apreciată prin numărul real de cicluri de solicitare până la care apar primele fisuri de oboseală termică pe probele supuse experimentărilor. Cercetările au fost realizate în cadrul grantului de cercetare obținut prin competiție la nivel național AT, Nr. 32 940/22.06.2004 cod CNCIS 24, Tema 6 și Tema 7/2005. În vederea desfășurării experimentărilor s-au ales patru mărci de oțeluri și două de fonte, materiale din care sunt realizați cilindri laminoarelor industriale. La finalul experimentărilor s-a observat că cel mai bine s-a comportat oțelul Adamit, oțel care are în compoziția chimică carbonul spre limita superioară și un conținut apreciabil de crom și nichel. Celelalte mărci de oțeluri și fonte studiate au suportat relativ bine solicitările la oboseală termică într-un regim ușor de solicitare și acceptabil la solicitările din regimurile de solicitare medii și grele, rezultatele obținute în laborator fiind comparate cu cele din mediul industrial. Cercetările au condus spre concluzia că fenomenul de oboseală termică este mai accentuat la viteze relativ mici de rotație a cilindrilor de laminare. În continuare în cadrul capitolului s-au propus două materiale pentru fabricarea cilindrilor de laminare la cald, care au fost supuse determinărilor de rezistență la oboseală termică după un regim mediu de solicitare. Rezultatele obținute au arătat că cele două materiale au o rezistență mai bună la oboseală termică decât oțelurile și fontele utilizate, la momentul respectiv, în fabricarea cilindrilor de laminare. Capitolul se încheie cu determinarea parametrilor șocului termic pentru cele șase materiale studiate. Cea mai bună comportare la acțiunea șocului termic o are fonta FNS 2, iar mărcile de oțeluri sunt cele mai expuse la producerea acestuia. Cercetările întreprinse în perioada post-doctorală asupra cilindrilor de laminare la cald au fost de utilitate practică în cadrul combinatului siderurgic hunedorean, ele înscriindu-se în contextul perfecționării tehnologiilor de fabricație și de exploatare a cilindrilor de laminare la cald.

CAPITOLUL 6: EVALUAREA REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ TERMICĂ A ORGANELOR DE MAȘINI FIXE ȘI MOBILE DIN COMPONENTA MOTOARELOR CU ARDERE INTERNĂ, prezintă extinderea experienței acumulate în domeniul cilindrilor de laminare la cald asupra organelor de mașini fixe și mobile din componenta motoarelor cu ardere internă care sunt supuse în timpul funcționării fenomenului de oboseală termică. În acest sens s-a conceput și realizat o instalație care permite efectuarea experimentărilor în acest sens. Proiectul acestei instalații a constituit documentația pe baza căreia autoarea acestei teze de abilitare a obținut brevetul de invenție Nr.126996/30.03.2016 cu titlul "Instalație pentru studiul rezistenței la oboseală termică". Instalația a fost premiată cu 3 medalii de aur, una de argint și două diplome de excelență la saloanele de invenție din țară. În acest capitol se prezintă detaliat concepția constructivă și funcțională a instalației, precum și principiul cercetărilor experimentale. La final, se prezintă determinările experimentale care validează conceptul instalației.

CAPITOLUL 7: STUDIUL CARACTERISTICILOR MATERIALELOR COMPOZITE ECOLOGICE DESTINATE REALIZĂRII PLĂCUȚELOR DE FRÂNĂ PENTRU AUTOVEHICULE, prezintă principalele realizări științifice în domeniul producerii, caracterizării și testării materialelor de fricțiune ecologice destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehicule mici și performanțe medii. În cadrul capitolului sunt analizate două materiale de fricțiune, unul cu fibră de nucă de cocos și celălalt cu pulbere obținută din cochilii de scoici. Pentru ambele materiale s-au determinat caracteristicile fizico-mecanice și tribologice. Materialul de fricțiune cu fibră de nucă de cocos a fost testat în laborator la frânări intensive, pe o instalație experimentală concepută și realizată în acest scop. Instalația a fost premiată cu o medalie de aur și o diplomă de excelență la expozițiile de invenție din țară. În vederea validării rețetei materialului de fricțiune s-au realizat plăcuțe de frână care au fost montate pe puntea față a unui autovehicul în vederea determinării performanțelor de frânare, experimentări efectuate într-o stație pentru Inspecții Tehnice Periodice. Performanțele de frânare ale plăcuțelor ecologice au fost comparate cu cele ale plăcuțelor de frână semimetalice, omologate conform standardelor ECE R90, care au echipat același autovehicul și au fost testate în aceleași condiții. Ca urmare a testelor efectuate s-a constatat că plăcuța de frână produsă în laborator are un comportament adecvat și poate lucra în condiții reale de funcționare. Condițiile și parametrii de testare utilizați în aceste experimentări nu pot însă simula exact toate condițiile de testare prin rularea autovehiculului pe drum. Validarea finală a rețetei se bazează pe

rezultatele performanței rutiere. Totuși, pentru ca plăcuțele de frână produse în laborator să poată fi supuse testelor de performanță rutieră sunt necesare încercări preliminare pentru a ne asigura că materialul de frecare poate funcționa în condițiile reale de rulare a autovehiculului. Testul final de validare a materialului de fricțiune produs în laborator se va realiza prin determinarea parametrilor capacității de frânare ai autovehiculului echipat cu plăcuțe cu fibră de nucă de cocos la rulare în condiții de drum, dar aceste teste vor face obiectul unei alte lucrări.

În ceea ce privește materialul de fricțiune realizat cu pulbere obținută din cochilii de scoici, acesta a fost produs în laborator și caracterizat din punct de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice și tribologice, urmând să fie testat în continuare conform standardelor în vigoare.

Ca orice cercetare dezvoltată pe o anumită temă, nu se poate spune că se finalizează la un moment dat, deoarece permanent se pot deschide oportunități de dezvoltare și aprofundare, cu reluarea etapelor parcurse în cercetare sub o altă abordare sau prin impunere de noi tehnici de lucru, acest lucru deschizând perspective și direcții viitoare de cercetare.

PARTEA a-II-a: PERSPECTIVE DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE A CARIEREI PROFESIONALE, ȘTIINȚIFICE ȘI ACADEMICE, prezintă principalele direcții și obiective care vor constitui baza pentru dezvoltarea carierei didactice și de cercetare științifică. Astfel, se sintetizează planul de dezvoltare a carierei, atât din perspectiva academică, cât și din cea științifică și profesională, care vor sta la baza creșterii vizibilității Universității POLITEHNICA Timișoara pe plan național și internațional.

Teza de abilitare se încheie cu referințele bibliografice care cuprind atât reperele bibliografice generale, cât și publicațiile proprii care au stat la baza elaborării acesteia.

Prin elementele originale, cercetările efectuate au permis noi abordări în domeniile studiate și au deschis o multitudine de direcții de cercetare pe care autoarea acestei teze de abilitare dorește să le dezvolte în continuare.

ABSTRACT

The postdoctoral thesis named **“BEHAVIOR OF METAL AND COMPOSITE MATERIALS UNDER MECHANICAL-THERMAL STRESSES”** represents a synthesis of my concerns and scientific activity in the period following the defense of the doctoral thesis from 2002, at the POLITEHNICA Timișoara University, titled “Optimization of the strength structures of metallurgical equipment”, under the guidance of Prof.univ. dr.Eur.Ing. Tiberiu Dimitrie Babeu, when I obtained my PhD in Mechanical Engineering.

Although some of the postdoctoral studies have remained in the field of metallurgical equipment, their approach has a multidisciplinary character, requiring knowledge in the following fields: Mechanical Engineering, Materials Science, Mathematics and Computer Science.

The presentation of the research conducted so far reflects the experience gained through the didactic and research activity carried out during 28 years at the Faculty of Engineering Hunedoara, POLITEHNICA University Timișoara.

The significant scientific and professional achievements have been earned from two approaches. In the first approach, the increase of the durability of the rolling cylinders was studied, by observing the behavior of the materials needed for their manufacturing (steels and cast iron) under the action of the operational mechanical and thermal stresses. The second approach had as results the production, characterization and testing of composite materials, made of organic fibers, intended for brake pads for small vehicles and medium performances. The two research directions were correlated with the didactic activity carried out, in the sense that, on the one hand, we involved the students in the research activity, and on the other hand, the scientific results obtained were capitalized in the didactic process.

The postdoctoral thesis includes the most important results obtained from the two research directions approached, which materialized in two scientific research contracts awarded through national competition, an invention registered at OSIM (Romanian State Office for Inventions and Trademarks), a monograph published by a renowned CNCSIS publishing house, two computer applications and 150 scientific papers, of which 22 Web of Science, 31 BDI (ISI Proceedings and Scopus), 31 in other data base and the rest in other databases.

The quality of the rolling cylinders influences the production and the quality level of the rolled products. During the production process, the quality of the rolling cylinders is assessed based on their hardness, strength and stability at high temperatures. These characteristics determine the high wear resistance as well as their resistance to sudden temperature variations. Fulfilling these requirements implies, on the one hand, the correct choice of material and manufacturing technology, and, on the other hand, their proper operation.

The research carried out in this direction over a period of 15 years was summarized in this postdoctoral thesis and represents a first main research approach adopted during the postdoctoral period. The addressed topic includes elements of fundamental, applied and industrial research.

The aim of the approached research topic refers to the increase of the durability during the operation of the hot rolling mills cylinders, by evaluating their behavior when subjected to mechanical and thermal stresses.

The specific objectives pursued in this research relate to:

- The analysis of the factors leading to the breaking of the hot rolling cylinders;
- The theoretical study of the distribution of temperature fields on the surface and in the radial section of the cylinders during the hot rolling process;
- The design and the assembly of the installation needed for the determination of the temperature variations on the surface and in the surface layer of the hot rolling

cylinders as well as of the equipment used for determining the rolling forces, adapted to the experimental rolling mill;

- The experiments made in laboratory conditions in order to observe the thermal regime of the hot rolling cylinders;
- The determination of the mechanical, thermal and equivalent stresses of the hot rolling cylinders;
- The optimization of the stress level of the rolling cylinders;
- The study of the thermal fatigue resistance in order to assess the durability of hot rolling cylinders;
- The comparison of the results obtained in the laboratory with the industrial ones;
- The proposals of materials with high resistance to thermal fatigue for the manufacture of hot rolling cylinders;
- The study of the possibilities of transposing the experience gained in the field of thermal fatigue of hot rolling cylinders to the fixed and mobile machine parts of the internal combustion engines;
- The designing, assembly and validation of the installation used for the study of the thermal fatigue resistance of the machine parts subjected to the thermal fatigue phenomenon during the operation process.

In order to achieve these objectives, a thorough documentation in the specialized literature as well as a detailed analysis of the technical reports on the behavior of the hot rolling mills during operation were necessary. In this regard we used the data received from the Hunedoara Steel Factory. The results of the laboratory studies were implemented later at industrial level.

The separation of the temperature fields producing thermal stresses into symmetric and asymmetric, their experimental confirmation and the transposition of the research on the thermal fatigue resistance of hot rolling cylinders to other machine parts subjected to this phenomenon, by designing and assembling a suitable installation in this respect, represent the DEGREE OF ORIGINALITY AND INNOVATION of this research.

The second direction of research got materialized following my appointment into the advisory committee of a doctoral student who studied the materials used for the braking systems of vehicles for his PhD thesis. As a result of my involvement in the research activity, a new perspective opened regarding the finding of ecological materials that would offer superior performances to the functioning of the products. The main objective of this line of research is to develop friction materials for brake pads, based on natural fibers, capable of reducing the emission of fine particles resulting from the braking systems of vehicles. The testing and the assessing of their functionality were done via a multi-analytical approach. The use of different experimental tools provides a complete characterization of the raw materials and surfaces resulting from the manufacturing technology. The chosen organic fibers are the coconut fiber and the crushed seashell powder. They are wear-resistant and can be combined with other materials without adverse effects on the environment and human health.

The specific objectives pursued during the research are:

- The study of the specialized literature on composite materials and their manufacturing technologies;
- The choosing of the recipe components and of the sintering technology parameters;
The laboratory production of coconut fiber and shellfish powder composites;
- The determination of the physical-mechanical and tribological characteristics;
- The testing of the produced materials in accordance with the current standards.

The research conducted in this direction does not offer immediate practical applicability, because of the price of the organic raw materials. However, these studies have opened up new research directions concerning the use of other economically advantageous types of organic fibers or a combination of fibers (flax fiber, rape fiber, cane fiber) for the production of friction materials.

THE POSTDOCTORAL THESIS respects the structure imposed by the current norms of CNADTCU (Romanian National Council for Attestation of University Degrees, Diplomas and Certificates), including two parts, structured on 7 distinct chapters and a selective bibliography.

PART I contains seven chapters.

CHAPTER 1: SYNTHESIS OF THE SCIENTIFIC, DIDACTIC AND ACADEMIC RESULTS

This part of the thesis is dedicated to presenting the most relevant results obtained during my professional career. In this section, the directions approached in the postdoctoral scientific, didactic and academic activity are outlined. In terms of the didactic activity, the references highlight the teaching activity and the guidance of bachelor's and dissertation papers, the hard work done for the modernization and endowment of the laboratories with teaching material, as well as the didactic role of the publishing activity consisting in publishing courses and laboratory guidance papers for the students and graduates. Modern teaching-assessment methods based on the principles of quality assurance in learning were adopted for the didactic activity. The scientific research activity materialized into the grants received as director, as well as member of advisory committees for doctoral students and into the publishing activity having as main objective the publishing of specialized books and scientific papers. The extensive scientific research facilitated the knowledge transfer to my students and helped me to continuously improve and refresh my specialized and teaching attainments. This synthesis highlights the main directions representing the base of my personal development, but also the contributions made for the institutional progress.

CHAPTER 2: BEHAVIOR OF MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF HOT ROLLING CYLINDERS UNDER THE ACTION OF OPERATING STRESSES summarizes the author's main research direction. This chapter provides a brief introduction to the field of hot rolling cylinder research, marking the direction in which this research is to be conducted. For this purpose, the causes leading to the breaking of the hot rolling mill cylinders during their operation were studied, an analysis of the materials from which the respective cylinders are manufactured being carried out by using the existing data received from the Hunedoara Steel Factory. The conclusions of this study show that the breaking of almost half of the cylinders during the rolling process, in the analyzed period, was due to the inadequate thermal regimes to which they are subjected during the operational process. These regimes have caused the occurrence of the thermal fatigue phenomenon, respectively of thermal shocks, and that is the main reason why the subsequent research has moved on in that direction. The distribution of temperature fields on the surface and in the radial section of hot rolling cylinders was also analyzed in this chapter based on the specialized literature. The resulting conclusions show a separation of the thermal fields into symmetric and asymmetric, the theory being confirmed by the subsequently performed experiments.

CHAPTER 3: STUDY OF THE THERMAL REGIME OF HOT ROLLING CYLINDERS, presents the achievements of the postdoctoral period regarding the equipment used to determine the temperature variations on the surface and in the radial section of the hot rolling cylinders, as well as their experimental ascertainment, approached by using two methods: oscillography of the rolling process and use of analog modules and electronic computing technology. In order to analyze the temperature distribution inside the hot rolling cylinders, a mathematical model was developed to confirm the data gathered from the conducted experiments. Knowing the temperature variations in hot rolled cylinders makes it possible to study the durability and stability of the various steel and cast iron brands used for their manufacturing and provide sufficient evidence for the research carried out in this regard. Furthermore, the separate study of the symmetric and asymmetric temperature fields allows us to determine separately the thermal stresses they generate, while the effects of the stresses acting on the hot rolling cylinders are superpositioned.

CHAPTER 4: ASSESSMENT OF THE STRESSES ACTING ON THE HOT ROLLING CYLINDERS, shows the scientific contributions and achievements regarding the determination of the mechanical, thermal and equivalent stresses acting on the surface of the hot rolling cylinders. These studies were conducted within the research grant awarded through national competition AT, Nr. GR/19.05.2006 code CNC SIS 45, Topic 3. The research shows that the mechanical stresses affecting the rolling cylinders during the operational process, have practically insignificant values. The stresses that lead to the destruction of their calibers are the thermal stresses produced by the asymmetric temperature fields. They have a cyclical character, are repeated at each rotation of the cylinders and are mainly responsible for the occurrence of the thermal fatigue phenomenon. In this context, the study of the thermal stresses acting on the rolling cylinders is urgently needed not only to reduce the number of the cracks caused by the thermal fatigue phenomenon, with the main purpose of increasing the service life, but also to avoid the

especially dangerous thermal shocks, caused by the big, instant temperatures variations, leading to the shearing of the cylinder caliber cords in their maximum section. In the final part of the chapter, an optimisation of the equivalent stresses was carried out, the optimisation field allowing the formulation of recommendations in order to mitigate the destruction of the cylinder calibers and to avoid their breaking caused by the thermal shocks.

CHAPTER 5: ASSESSMENT OF THE THERMAL FATIGUE RESISTANCE OF HOT ROLLING CYLINDERS, presents the main scientific achievements related to the durability of the hot rolling cylinders by assessing their thermal fatigue resistance, determined based on the actual number of stress cycles until the occurrence of the first cracks on the surface of the samples subjected to experiments because of the thermal fatigue phenomenon. The studies were conducted within the research grant awarded through national competition AT, Nr.32 940/22.06.2005 CNCIS code 24, Topic 6 and Topic 7/2005. In order to carry out the experiments, four brands of steel and two brands of cast iron were chosen, materials used to manufacture the industrial rolling mill cylinders. At the end of the experiments, the best behaviour observed was manifested by Adamit steel, a steel brand having in its chemical composition carbon levels reaching the upper limit and an appreciable content of chromium and nickel. The other studied brands of steels and cast iron withstood relatively well the stresses exercised by the thermal fatigue phenomenon in an easy stress regime and had an acceptable behaviour under the stresses generated in medium and heavy stress regimes, the laboratory results being compared with those from the industrial environment. The research led to the conclusion that the thermal fatigue phenomenon is more accentuated at relatively low rotational speeds of the rolling mill cylinders. Further on in this chapter, two materials used for the manufacture of hot rolling were proposed to be subjected to the assessment of the thermal fatigue resistance being subjected to an average stress regime. The results obtained showed that the two proposed materials have a better thermal fatigue resistance than the steel and cast iron types used at that time for the manufacture of rolling cylinders. The chapter ends with the determination of the thermal shock parameters for the six studied materials. The best behaviour to the effects of thermal shock was manifested by the cast iron FNS 2, while the steel brands are the most exposed to its occurrence. The research conducted in the postdoctoral period on hot rolling mill cylinders had a practical importance for the Hunedoara Steel Factory, and it is part of the technological improvement action plan concerning the hot rolling cylinders manufacture and operation processes.

CHAPTER 6: ASSESSMENT OF THE THERMAL FATIGUE RESISTANCE OF FIXED AND MOBILE MACHINERY COMPONENTS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES, presents the expanding of the experience gained in the field of hot rolling cylinders over the fixed and mobile machinery components of internal combustion engines subjected during their operation to the phenomenon of thermal fatigue. In this regard, an installation has been designed and built in order to be able to conduct relevant experiments. The project documentation for this equipment was used by the author of this postdoctoral thesis to receive the patent No. 126966/ 30.03.2016 named "Installation for the study of thermal fatigue resistance". The installation was awarded 3 gold and 1 silver medals as well as two diplomas of excellence at several national invention exhibitions. This chapter presents in detail the design, construction and operation guidelines of this installation, as well as the principle of experimental research. At the end, the experimental assessments validating the concept of the installation are detailed.

CHAPTER 7: STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF ECOLOGICAL COMPOSITES FOR THE MANUFACTURING OF BRAKE PADS FOR VEHICLES, presents the main scientific achievements in the field of production, characterization and testing of environmentally friendly friction materials used for the manufacturing of brakepads for small and medium performance vehicles. The chapter analyzes two friction materials, one with coconut fiber and the other with crushed seashell powder. The physico-mechanical and tribological characteristics were determined for both materials. The friction material with coconut fiber was tested for intensive braking in the laboratory, on an experimental installation designed and built for this purpose. The installation was awarded a gold medal and a diploma of excellence at some national invention exhibitions. In order to validate the composition of the friction material, brake pads were manufactured and mounted on the front axle of a vehicle in order to determine their braking performance, the experiments being conducted in a workshop for Periodic

Technical Inspections. The braking performance of the eco-pads has been compared to that of the semi-metallic brake pads, homologated according to the ECE R90 standards, which have been mounted to the same vehicle and tested under the same conditions. As a result of the tests performed, it was found that the brake pad produced in the laboratory shows an appropriate behaviour and can work in real operating conditions. However, the test conditions and parameters used for these experiments cannot exactly simulate all the test conditions when driving the vehicle on the road. The final validation of the recipe should be based on the results of the on-road performance. Nevertheless, in order for the brake pads produced in the laboratory to be subjected to road performance tests, preliminary tests are required to ensure that the friction material can operate under the actual running conditions of the vehicle. The final validation test of the friction material produced in the laboratory will be performed by determining the braking capacity parameters of the vehicle equipped with coconut fiber break pads when driving on the road, but these tests will be the subject of a different paper.

Concerning the friction material made with chrushed seashell powder, we can mention that it has been produced in the laboratory, its physical-mechanical and tribological characteristics being defined, and will be further tested according to the standards in force.

Like any research conducted on a certain topic, it cannot be reported as completed at a certain moment, as new development and knowledge enhancement opportunities can be constantly identified, the resumption of certain research stages by using a different approach or by imposing new work techniques being always possible, opening up future reasearch perspectives and directions.

PART II: PERSPECTIVES AND DEVELOPMENT FOR PROFESSIONAL, SCIENTIFIC AND ACADEMIC CAREER DEVELOPMENT, presents the main directions and objectives which will form the basis for the development of the teaching and scientific research career. Thus, the career development plan is summarized, both from an academic perspective, as well as from a scientific and professional one, aiming mainly to increase the popularity of the POLITEHNICA Timișoara University at a national and international level.

Finally the post doctoral thesis includes the list of the general bibliographic reference articles, books and papers and own publications used for the elaboration of this postdoctoral thesis.

Due to its original elements, the conducted research allowed the use of new approaches in the studied fields and opened a multitude of research directions that the author of this postdoctoral thesis plans to develop continuously.

Partea I

CAPITOLUL 1

SINTEZA REZULTATELOR ȘTIINȚIFICE, PROFESIONALE ȘI ACADEMICE

1.1. Introducere

Teza de abilitare **“Comportarea materialelor metalice și compozite sub acțiunea solicitărilor mecano-termice”** prezintă sinteza activității didactice și de cercetare științifică desfășurată ulterior susținerii tezei de doctorat și obținerii titlului de doctor în anul 2002 în domeniul INGINERIEI MECANICE. Lucrarea se bazează pe rezultatele științifice publicate și pe realizările profesionale obținute în perioada post-doctorală de subsemnata, **dr.ing. PINCA-BRETOTEAN Camelia**.

Din septembrie 1994, activitatea profesională, didactică și de cercetare științifică am desfășurat-o în cadrul Catedrei de Mecanică, actualmente Departamentul de Inginerie și Management, de la Facultatea de Inginerie Hunedoara, Universitatea Politehnica Timișoara, în prezent fiind Conferențiar Doctor Inginer. Preocupările de cercetare au existat încă din perioada studenției, când activitatea de cercetare științifică am desfășurat-o în cadrul colectivelor de cercetare științifică mixte, cadre didactice - studenți și a continuat până în prezent.

Activitatea profesională desfășurată s-a materializat prin asimilarea unor cunoștințe avansate care au contribuit la dobândirea unei viziuni moderne asupra activității didactice și de cercetare. Principalele realizări profesionale și academice obținute în perioada 2003-2022, după susținerea tezei de doctorat (2002) și obținerea titlului de doctor sunt reprezentate de promovarea în funcția de conferențiar (2004), implicarea în granturi și contracte de cercetare ca director sau colaborator, membru în comitetele științifice ale unor manifestații științifice naționale și internaționale, membru în diferite asociații profesionale, participarea la conferințe naționale și internaționale, publicarea rezultatelor cercetării în cărți, reviste și jurnale.

În cuprinsul acestei teze de abilitare, se regăsesc opiniile și metodele proprii de abordare și rezolvare a diferitelor probleme legate de comportarea materialelor metalice și a celor compozite sub acțiunea solicitărilor mecanice și termice. În lucrare sunt evidențiate elementele definitorii pentru concepția personală privind determinarea rezistenței la oboseală termică a cilindrilor de laminare la cald, dar și a altor organe de mașini supuse acestui fenomen, respectiv producerea, caracterizarea și testarea unor materiale compozite ecologice destinate realizării plăcuțelor de frână. Tematica abordată include elemente de cercetare fundamentală, aplicativă în laborator și la nivel industrial.

Prin conținutul ei, teza abordează un domeniu științific multidisciplinar, deosebit de complex, având la bază concepte, principii și modele teoretice avansate, din perspectiva experienței practice și a rezultatelor studiilor și a cercetărilor proprii derulate pe parcursul anilor de la susținerea tezei de doctorat. Având în vedere natura fenomenelor abordate, precum și evoluția cercetării științifice, au fost necesare cunoștințe din mai multe domenii, cum ar fi: Inginerie mecanică, Știința materialelor, Matematică, Informatică, justificându-se astfel caracterul multidisciplinar al domeniului abordat.

1.2 Tematica abordată

Tematica abordată în cadrul activității de cercetare post doctorală s-a desfășurat pe două direcții:

- una axată pe probleme care se referă la creșterea durabilității cilindrilor de laminare la cald prin studiul comportării materialelor destinate realizării acestora (oțeluri și fonte) sub acțiunea solicitărilor mecanice și termice din exploatare;

- cea de a doua s-a concretizat prin producerea, caracterizarea și testarea unor materiale compozite, realizate cu fibre organice, destinate realizării plăcuțelor de frână ecologice pentru autovehicule mici și performanțe medii.

Teza de abilitare prezintă principalele realizări profesionale și contribuțiile științifice din această perioadă, fiind structurată pe trei părți.

Prima parte cuprinde șapte capitole și prezintă informații referitoare la activitatea didactică, de cercetare științifică, vizibilitatea și impactul activității desfășurate de autoare, din anul 2002, după susținerea tezei de doctorat, precum și o sinteză a cercetărilor și a rezultatelor obținute pe cele două direcții de cercetare abordate.

În partea a-II-a se prezintă direcții de evoluție și dezvoltare a cariei profesionale, științifice și academice care vor completa realizările obținute în prima parte, vizând obiective specifice.

Teza de abilitare se încheie cu prezentarea referințelor bibliografice generale, precum și a celor proprii, specifice primelor două părți.

1.3 Elemente definitorii ale activității didactice

În perioada post-doctorală activitatea de predare a inclus următoarele cursuri: Utilaje pentru turnătorie, Utilaje pentru siderurgie, Utilaje pentru deformări plastice, Utilaje metalurgice, Utilaje tehnologice, Tehnologii și echipamente de montaj, Tehnologia fabricării și reparării utilajelor tehnologice, Fabricarea și asamblarea autovehiculelor rutiere, Tehnologii specifice în fabricarea autovehiculelor rutiere, Tehnica construcțiilor de mașini, Echipamente mecanice industriale, Calculul și construcția autovehiculelor rutiere, Metode de optimizare în proiectarea asistată de calculator, Caroserii și structuri portante.

Pe parcursul acestor ani am încercat să îmbunătățesc și să adaptez cerințelor studenților, cursurile predate, atât ca formă și conținut, cât și ca prezentare. În acest sens, am urmărit îmbunătățirea continuă a conținutului științific al cursurilor în scopul creșterii nivelului acestora și a gradului de atractivitate, în vederea asimilării de către studenți a cunoștințelor predate. Dintre lucrările publicate în sprijinul studenților din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara, Universitatea Politehnica Timișoara sunt evidențiate următoarele cărți:

- *Utilaje metalurgice*, Editura Politehnica Timișoara, 2002;
- *Fabricarea și asamblarea autovehiculelor rutiere*, vol.I, Editura Cermi, 2008;
- *Fabricarea și asamblarea autovehiculelor rutiere*, vol.II Editura Politehnica, 2010;
- *Echipamente mecanice industriale* Editura „Politehnica”, 2013

În ceea ce privește activitățile de laborator am regândit integral setul de teme tratate, promovând studiul combinat între metoda experimentală și cea de prelucrare pe calculator, cu succes în rândul studenților la disciplinele predate. Astfel, au fost publicate următoarele cărți care conțin teme experimentale și demersuri practice:

- *Tehnologii de prelucrări mecanice la fabricarea utilajelor tehnologice*, Editura Mirton Timișoara, 2003, destinată desfășurării lucrărilor de laborator pentru studenții anului IV de la specializarea „Inginerie economică în domeniul mecanic”;
- *Tehnologia fabricării componentelor autovehiculelor rutiere. Teme de laborator*, Editura Cermi, Iași, 2008, destinată desfășurării lucrărilor de laborator pentru studenții anului IV de la specializarea „Autovehicule rutiere”;
- *Echipamente mecanice industriale. Teme experimentale*, Editura Politehnica, Timișoara, 2015, destinată desfășurării lucrărilor de laborator pentru studenții anului III de la specializările „Inginerie economică în domeniul mecanic” și „Inginerie economică în domeniul chimic și de materiale”;
- *Transmisii mecanice pentru autovehicule. Demers practic*, Editura Politehnica, Timișoara, 2020, destinată desfășurării lucrărilor de laborator pentru studenții anului III de la specializarea „Autovehicule rutiere”.

Lucrarea „*Transmisii mecanice pentru autovehicule. Demers practic*” a fost premiată cu:

- Medalia de argint la EUROINVENT BOOK SALON, Expoziția Europeană de Creativitate și Inovare - Ediția a-13-a, 22 mai 2021;

- Medalia de aur la Expoziția Internațională INVENTCOR, Ediția a-II-a, 16-18 decembrie, Deva, 2021.

Am desfășurat activitate de cadru didactic coordonator pentru studenții specializărilor: Utilaj tehnologic 2004-2006, an II master - Materiale și Tehnologii Avansate pentru Industria Autovehiculelor – anul universitar 2010/2011, Autovehicule rutiere, din anul I până în anul IV (2012-2016 și 2016-2021). În perioada 2010-2012 am efectuat și condus practica tehnologică pentru studenți anului III AR la întreprinderi din Hunedoara. Deasemenea, am coordonat activitatea de proiect de diplomă, respectiv dizertație pentru studenții din anii terminali de la licență și master.

M-am ocupat de dotarea și modernizarea laboratoarelor de “Calculul și construcția autovehiculelor rutiere” și “Sisteme mecanice industriale” din cadrul Facultății de Inginerie Hunedoara.

În ceea ce privește laboratorul de “Calculul și construcția autovehiculelor rutiere” acesta a fost înființat odată cu apariția în cadrul facultății a specializării “Autovehicule rutiere”, specializare apărută în anul 2010, care a înlocuit specializarea „Utilaje tehnologice”. În dotarea laboratorului am implicat studenții specializării prin abordarea unor teme de diplomă care au vizat realizarea de standuri de laborator și machete didactice care să permită studiul constructiv și funcțional al diferitelor subansambluri din componența autovehiculului.

În ceea ce privește laboratorul de “Sisteme mecanice industriale”, acesta a fost modernizat în anul 2020, modernizare ce a constat în extinderea posibilităților de utilizare a acestui laborator la toate specializările din cadrul Departamentului de Inginerie și Management de la Facultatea de Inginerie din Hunedoara. Actualmente, denumirea laboratorului este „Transmisii mecanice” și permite efectuarea lucrărilor de laborator la specializările: Inginerie economică în domeniul mecanic, Inginerie economică în industria chimică și de materiale, Ingineria valorificării deșeurilor și Autovehicule rutiere.

Am avut contribuții importante la dezvoltarea bazei materiale din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara, în concordanță cu standardele specifice, ca urmare a finanțării obținute prin câștigarea prin competiție la nivel național, a două granturi de tip AT, în perioada 2004-2006. Ca director de grant am manageriat activitățile de cercetare și cele economice, efectuate de către echipă.

Dezvoltarea bazei materiale nu se limitează doar la cele două granturi anterior amintite, ci ea a continuat pe întreg parcursul activității mele, ultima dotare fiind realizată în anul 2020 ca urmare a finanțării obținute prin grantul suport RA-Q, acordat de către Universitatea Politehnica Timișoara.

Activitatea didactică s-a perfecționat și datorită cooperării cu cadrele didactice de la alte facultăți/colegii tehnice din țară, aceasta concretizându-se prin vizite de documentare în laboratoarele de specialitate, discuții cu privire la metodica predării și formele de evaluare a cunoștințelor, precum și colaborări științifice în vederea elaborării unor publicații de specialitate.

Am participat fie ca membru, fie ca președinte în numeroase comisii de licență și disertație, după cum urmează:

- Membru al Comisiei de admitere - licență, sesiunea iulie 2009;
- Membru al Comisiei de admitere la doctorat, 2010;
- Membru al Comisiei de Licență la specializarea Inginerie Economică în Domeniul Mecanic-2010-2013;
- Membru al Comisiei de Disertație la specializarea Ingineria și Managementul Sistemelor Mecanice 2010-2012; 2020, 2021
- Președinte al Comisiei de Disertație la specializarea Ingineria și Managementul Sistemelor Mecanice, 2013-2019
- Președinte Comisie de Licență la specializarea Inginerie Economică în Domeniul Mecanic, 2014-2019.
- Membru Comisie de Licență la specializarea Autovehicule rutiere, 2014-2018, 2020.

Am activat în calitate de președinte al board-ului la specializarea Autovehicule rutiere în perioada 2010-2012, iar în prezent membru în board-ul aceleiași specializări și președinte al board-ului specializării Inginerie Economică în Domeniu Mecanic. Astfel, am participat la întocmirea dosarelor pentru acreditare/evaluare, precum și la discuțiile desfășurate în cadrul facultății cu ocazia vizitei comisiei ARACIS, în vederea acreditării acestor specializări. În anul universitar 2010-2011, în urma vizitei în vederea acreditării specializării “Autovehicule rutiere”, în calitate de președinte al board-ului am

modificat planurile de învățământ ale specializării în conformitate cu observațiile făcute de comisia ARACIS.

În perioada 2009-2012 am fost responsabil cu calitatea procesului didactic în cadrul Facultății de Inginerie Hunedoara, iar în perioada 2008-2010 am participat la întocmirea orarelor necesare desfășurării activității didactice din cadrul Departamentului de Inginerie și Management de la Facultatea de Inginerie Hunedoara.

Am coordonat studenții în elaborarea unor lucrări științifice și machete educaționale cu care am participat la conferințe studențești naționale, unde am obținut 10 premii, respectiv 3 premii la expoziții de inventică.

În ceea ce privește activitatea de marketing educațional am participat la atragerea de candidați la admitere prin prezentarea ofertei educaționale a Facultății de Inginerie din Hunedoara, în liceele din Ilia și Hunedoara. De asemenea, am fost membru în comisii profesionale de concurs pentru ocuparea posturilor didactice și a posturilor personalului didactic auxiliar.

Experiența managerială în cadrul instituției în care activez cuprinde și activitatea de membru în Consiliul Facultății de Inginerie din Hunedoara, în perioada 2005-2009, iar în perioada 2018-2021 am fost membră a Comisiei de Etică a Universității Politehnica Timișoara.

1.4 Elemente definitorii ale activității de cercetare științifică

Activitatea științifică desfășurată în perioada post-doctorală a inclus și preocuparea pentru diseminarea rezultatelor obținute în activitatea de cercetare. Astfel, am elaborat, susținut și publicat, în calitate de prim autor/autor corespondent, dar și ca și coautor în diferite colective, un număr de 150 de articole și lucrări științifice, dintre care:

- 3 articole publicate în reviste indexate Web of Science cu factor de impact (Metalurgia internațională, Revista de Materiale Plastice; Journal of Physics);
- 19 lucrări științifice publicate în volume ale conferințelor indexate ISI (AIP Conference Proceedings, Web of Science - Thomson Reuters (WOS),);
- 29 articole în reviste și volumele unor manifestări științifice indexate în baze de date internaționale (ISI Proceedings, SCOPUS);
- 31 articole în alte baze de date;
- 68 articole în extenso în Reviste/Proceedings naționale/internaționale neindexate.

Activitatea de cercetare științifică poate fi considerată reprezentativă prin următoarele proiecte de cercetare câștigate prin competiție la nivel național, în calitate de director:

- Cercetări de durabilitate în exploatarea a cilindrilor de laminare la cald, Grant AT 32 940/22.06.2004 cod CNCIS 24, Tema 6 și Tema 7/22005;
- Cercetări și experimentări privind tensiunile termice și echivalente din cilindri de laminare la cald în scopul creșterii duratei lor de viață, Grant AT 58 GR/19.05.2006, cod CNCIS 45, Tema 3.

Activitatea de cercetare științifică se mai concretizează prin participarea ca membru în colectivele de cercetare ale unor granturi câștigate prin competiție la nivel național:

- Cercetări asupra rezistenței la oboseala termică a cilindrilor de laminare la cald, Grant Tip A, Nr. 5004/1996, Cod Program 11.2.2.1, Cod CNCISU 298;
- Cercetări asupra rezistenței la oboseala termică a cilindrilor de laminare la cald, Grant Tip A, Nr. 7004/1997, Tema 43, Cod CNCISU 1477;
- Cercetări și experimentări privind îmbunătățirea structurii semifabricatelor turnate continuu, Grant ET Nr.3196/2007, Programul Excelență - Proiect de cercetare pentru tineri cercetători;
- Tehnologii avansate de conducere a proceselor industriale de călire superficială a pieselor încălzite inductive, Nr.71-044, Programul 4 "Parteneriate în domenii prioritare" 2007-2013;
- Prevenirea și combaterea poluării în zonele industriale siderurgice, energetice și miniere prin reciclarea deșeurilor mărunte și pulverulente, Nr.31-098, Programul 4 "Parteneriate în domenii prioritare" 2007-2013.

Am participat, ca director sau membru în echipă, la diferite contracte de cercetare științifică pentru diverși beneficiari din mediul economic:

- Studiul optimizării structurii de rezistență a unui pod rulant de 10t, Nr.3065/27.06. 2002, beneficiar: S.C.” Construcții Metalice” Bocșa - **director**;
- Optimizarea structurii de rezistență a unui pod rulant de 10t pentru reducerea uzurii în exploatare, Nr.54/13.01.2003, beneficiar: SC. U.C.M.R. SA Reșița- **director**;
- Studiul și analiza structurilor portante ale instalațiilor de ridicat, Nr.375/07.02.2003, beneficiar: S.C.”Construcții Metalice” Bocșa - **director**;
- Cercetarea și proiectarea în vederea montajului instalației de captare a cenușilor zburătoare de termocentrala la grupurile 3 și 4 de electrofiltre de la termocentrala Mintia, Nr.685/ 15.05.2002, Beneficiar: S.C.Simcor Management S.A.Oradea,S.C. Ecocen Deva - **membru în echipă**;
- Școala universitară de formare inițială și continuă a personalului didactic și a trainerilor din domeniul specializărilor tehnice și ingineresti-DidaTech, POSDRU/87/1.3/S/60891- **membru în echipă**;
- Managementul licitațiilor publice și managementul calității în construcții, BC 47/09.07.2020- **membru în echipă**;
- Asigură-ți viitorul prin educație și antreprenariat-AVEA, POCU/379/6/21/6.7/6.9/6.10/123900 cod SMIS 123900 - **membru în echipă**.

În vederea diseminării rezultatelor cercetărilor din aceste granturi și contracte, precum și pentru a participa la schimbul de idei și informații, am participat la manifestări științifice organizate atât în țară, cât și în străinătate.

În perioada de după susținerea tezei de doctorat am elaborat și publicat la edituri recunoscute CNCIS, în calitate de autor unic și coautor, 2 monografii:

- Optimizarea structurilor de rezistență ale podurilor rulante, MIRTON Timișoara, 2003 - **unic autor**;
- Oboseala termică a cilindrilor de laminare la cald, POLITEHNICA, Timișoara, 2004 - **coautor**.

În anul 2013 am participat în cadrul proiectului “Școala universitară de formare inițială și continuă a personalului didactic și a trainerilor din domeniul specializărilor tehnice și ingineresti-DidaTec” POSDRU/87/1.3/S/60891, care a presupus învățarea unor metodologii de predare moderne și aplicarea acestora la cursurile și activitățile aplicative dedicate studenților masteranzi. Activitatea desfășurată în cadrul proiectului s-a materializat în elaborarea unor cursuri și activități aplicative în conformitate cu formarea în blended-learning care sunt găsite pe Campusul Virtual, <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=1001>.

Experiența acumulată în cadrul acestui proiect a fost deosebit de utilă pe parcursul acestei pandemii, când atât cursurile, cât și activitățile aplicative s-au desfășurat on-line. Astfel am elaborat suporturi de curs, aplicații pentru desfășurarea orelor de proiect, demersuri practice sub formă video la disciplinele predate. Toate aceste materiale didactice se găsesc pe Campusul Virtual al Universității Politehnica Timișoara, după cum urmează:

- Calculul și construcția autovehiculelor 1- an III Licență, specializarea Autovehicule rutiere, <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=2649>;
- Calculul și construcția autovehiculelor 2-an IV Licență, specializarea Autovehicule rutiere, <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=5203>;
- Echipamente mecanice industriale – an III Licență, specializările Inginerie economică în domeniul mecanic și Inginerie economică în domeniul chimic și de materiale, <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=5215>;
- Tehnologia construcțiilor de mașini- an IV Licență specializările Inginerie economică în domeniul mecanic, <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=5693>;
- Tehnologia fabricării și asamblării autovehiculelor rutiere, an IV Licență, specializarea Autovehicule rutiere, <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=5200>;
- Utilaje tehnologice, an III Licență, specializarea Ingineria valorificării deșeurilor, <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=2738>
- Metode de optimizare asistată de calculator în ingineria mecanică, an II Master, specializarea Ingineria și Managementul Sistemelor Mecanice, <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=1393>;

În anul 2013 am finalizat cursurile de master în domeniul Ingineria autovehiculelor, specializarea Ingineria sistemelor de propulsie pentru autovehicule, moment în care în lucrarea de disertație cu tema „Metode de investigare a oboselii termice la componentele motoarelor autovehiculelor” am elaborat documentația în LabView pentru o aplicație informatică educațională cu titlul: „Sistem inteligent pentru ridicarea caracteristicii temperatură-tensiune pentru termocuplurile Pt/Rh-Pt”.

În anul 2014 am realizat două aplicații informatice educaționale care au fost publicate în Analele Facultății de Inginerie Hunedoara- International Journal of Engineering:

- Aplicații ale instrumentației virtuale în determinarea câmpului de temperatură a cilindrilor de laminare la cald, Tom XII, Fascicula 3, aplicație utilă în cadrul orelor de laborator la disciplina “Sisteme mecanice industriale”, predată studenților de la specializările Inginerie economică în domeniul mecanic, Inginerie economică în industria chimică și de materiale;
- Aplicație LabView pentru diagnosticarea sistemului de frânare Tome XII, Fascicule 4 aplicație utilă în cadrul orelor de laborator la disciplina „Calculul și construcția autovehiculelor rutiere”, predată studenților de la specializarea Autovehicule rutiere.

Ca urmare a cercetărilor efectuate în perioada post-doctorală am obținut în anul 2016 ca unic autor, un brevet de invenție înregistrat OSIM, Nr.126966/30.03.2016, cu titlul: “Instalație pentru determinarea rezistenței la oboseală termică”. Instalația brevetată se află în dotarea laboratorului de “Transmisii mecanice” pe care îl coordonez în cadrul Departamentului de Inginerie și Management, de la Facultatea de Inginerie Hunedoara, iar beneficiarul acestei invenții este Universitatea Politehnica Timișoara. Cu acest brevet de invenție am obținut următoarele premii:

- Diploma de excelență și medalia PRO INVENT la Salonul Internațional al Cercetării Științifice, Inovării și Inventicii PRO INVENT, Ediția XVII, 20-22 martie 2019, Cluj-Napoca;
- Medalia de aur la EURO INVENT, Ediția 11, Expoziția Europeană de Creativitate și Inovare, 18 mai 2019, Iași
- Medalia de aur la Salonul Internațional de Invenții și Inovații “Traian Vuia”, 14 iunie 2019, Timișoara;
- Medalia INVENTICS 2020, la INVENTICA 2020 Ediția XXIV Expoziția Internațională de Inventică, 29-31 iulie, 2020, Iași
- Premiul special și medalia de aur la Expoziția Internațională INVENTCOR 2020, Ediția 1, 17-19 decembrie Deva
- Medalie de argint la Salonul Internațional de Invenții și Inovații “Traian Vuia”, 15 octombrie 2020, Timișoara.

Activitatea de cercetare științifică s-a extins începând cu anul 2014 asupra studiului caracteristicilor fizico-mecanice și tribologice ale materialelor compozite, realizate cu fibre organice, care constituie cea de-a doua direcție de cercetare din perioada post-doctorală. În acest sens s-au conceput și analizat mai multe materiale compozite destinate realizării plăcuțelor de frâne pentru autovehiculele rutiere de dimensiuni mici și performanțe medii. Rezultatele cercetărilor s-au concretizat în 18 lucrări științifice și o instalație experimentală pentru studiul comportării în laborator a plăcuțelor de frână la frânări intensive. Datorită noii direcții abordate am început colaborarea cu o echipă de cercetători din cadrul Universității Tehnice Sangam, Rajasthan din India, Departamentul de Inginerie Mecanică. Rezultatele obținute ca urmare a colaborării cu această echipă a condus la depunerea documentației pentru Invenția „Lean concepts in software industry” și 9 lucrări științifice publicate în conferințe ISI Precedings.

În perioada 2020-2021 am făcut parte din echipa de implementare a proiectului AVEA – “Asigură-ți viitorul prin educație și antreprenoriat” - POCU/379/6/21/6.7/6.9/6.10/123900 cod SMIS 123900, unde am desfășurat activități de predare la disciplina Eco-antreprenoriat. Experiența acumulată în domeniul cercetării materialelor compozite ecologice destinate realizării plăcuțelor de frână m-a ajutat în abordarea unor teme atractive pentru studenții participanți în cadrul acestui proiect.

Articolele științifice ce stau la baza întocmirii acestei teze de abilitare sunt:

1. **Pinca Bretotean Camelia**, Tirian G.O., Vilceanu L. (2008) *The effects of the thermal fatigue upon the hot rolling mill cylinders*, Metalurgia Internațional, XIII (5), 25-33

2. **Pinca-Bretotean Camelia**, Lemle L.D., Szabo A. (2019) *Ecological Composites Materials for Brake Pads Using Shells as Filler Material*, Materiale plastice 56(3), pg. 588-591, 2019, ISSN: 0025-5289, <https://doi.org/10.37358/MP.19.3.5234>
3. **Pinca-Bretotean Camelia**, Josan A., Puțan V. (2020) *Testing of brake pads made of non asbestos organic friction composite on specialized stand*, Materials Today: Proceedings, Vol. 45(5), pg. 2214-7853, 10.1016/j.matpr.2021.12.039
4. **Pinca-Bretotean Camelia**, Josan A., Preda C. (2019) *Numerical and experimental analysis of dry contact in pad disc*, Journal of Physics: Conference Series, Vol.1426, Issue 1, International Conference on Applied Sciences 2019, Article number 012001
5. Crăciun Andrei, **Pinca-Bretotean Camelia (autor corespondent)**, Uțu Dragoș, Josan Ana (2017) Tribological properties of nonasbestos brake pad material by using coconut fiber, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering/ISSN: 17578981, vol.163, pg.1-9, DOI: 10.1088/1757-899X/163/1/012038, WOS:000399755300014
6. **Pinca-Bretotean Camelia**, Crăciun A., Josan A., Ardelean E. (2018) *Experimental study of sintered friction material with coconut fiber for brake pads*, Materiale Plastice, 55(3), 389-392
7. **Pinca-Bretotean Camelia**, Crăciun A., Josan A., Ardelean M. (2019) *Friction and wear characteristics of organic brake pads material*, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, Vol. 477(1) No. 012009, DOI: 10.1088/1757-899X/477/1/012009, WOS:000461184100009
8. **Pinca-Bretotean Camelia**, Bhandari R., Sharma C., Preda C., Sharma A.K., An investigation of thermal behavior of brake disk pad assembly with Ansys, Materials Today proceedings, 479(10), pg.2322-2328, doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.296,
9. **Pinca-Bretotean Camelia**, Josan A., Birtok-Băneasă C (2018) *Laboratory testing of brake pads made of organic materials intended for small and medium vehicles*, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 393(1), No. 012029
10. **Pinca-Bretotean Camelia**, Crăciun A.L., Preda C., Sharma A.K. (2021) Physico-mechanical and tribological characteristics of composites used for brake pads, Journal of Physics: Conference Series 012032, Vol. 178(1), pg.1-8

În perioada 2011-2018 am participat în calitate de membru în comisiile de îndrumare de doctorat pentru ing. Păucă Adina, ing. Bularda Nicoleta și ing. Crăciun Andrei Lucian.

Teza de doctorat elaborată de ing. Adina Păucă, cu titlul „Cercetări privind îmbunătățirea caracteristicilor cilindrilor de laminor și comportarea acestora în exploatare” susținută în anul 2014 a avut ca scop creșterea caracteristicilor fizico-mecanice ale cilindrilor de laminor, prin alierea cu vanadiu până la o concentrație de 0,30%. Pentru realizarea temei propuse, s-au efectuat studii, cercetări experimentale, simulări, modelări și prelucrări matematice în vederea determinării variației celor mai reprezentative elemente din compoziția chimică, asupra caracteristicilor mecanice ale cilindrilor de laminare și indirect asupra durabilității, [29]. Pe parcursul elaborării tezei am coordonat doctoranda la efectuarea experimentărilor în fază de laborator în vederea determinării durabilității cilindrilor de laminor produși din oțelul 90VMoCr15. Experimentările s-au efectuat în laboratorul de „Sisteme mecanice industriale” din cadrul Facultății de Inginerie Hunedoara, pe un laminor degrositor experimental a cărui cilindrii au fost realizați din oțelul studiat.

A doua teză de doctorat la care am participat în calitate de membru în comisia de îndrumare a fost susținută de ing. Nicoleta Bularda, în anul 2015, cu titlul „Aliaje metalice pentru fabricarea jantelor de aluminiu”. Scopul acestei teze de doctorat a fost îmbunătățirea calității jantelor realizate din aliaje de aluminiu destinate autovehiculelor rutiere. În acest sens s-a analizat procesul tehnologic de elaborare a aliajului de aluminiu, în fază de laborator și s-a studiat influența compoziției chimice asupra caracteristicilor mecanice, stabilindu-se și tehnologia de tratament termic aplicat, atât în fază de laborator, cât și în fază industrială, [39]. Pe parcursul elaborării tezei am coordonat doctoranda la stabilirea tehnologiei de turnare, a tehnologiei de deformare plastică prin forjare și a celei de tratament termic pentru aliajul de aluminiu produs în laborator, precum și la compararea rezultatelor obținute în laborator cu cele din fază industrială.

Cea de a treia teză de doctorat a fost susținută în anul 2018 de către ing. Andrei Lucian Crăciun, cu titlul „Cercetări privind utilizarea materialelor compozite la sistemele de frânare ale autovehiculelor”. Scopul acestei teze a fost producerea în laborator și caracterizarea materialelor compozite cu fibră de

nucă de cocos destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehiculele mici și mijlocii. Pe parcursul elaborării tezei am coordonat doctorandul la stabilirea rețetelor și a parametrilor tehnologiei de sinterizare, am participat la efectuarea experimentărilor și a analizelor tehnologice privind obținerea și caracterizarea materialelor compozite, am coordonat doctorandul în analiza comportamentului tribologic al materialelor de fricțiune produse. Această teză de doctorat a deschis premisa unor noi cercetări asupra materialelor compozite, ecologice, destinate realizării plăcuțelor de frână. Acestea au fost continuate în anii următori, atât în direcția validării materialelor produse în teza de doctorat anterior amintită, prin teste de laborator, teste pe standuri specializate, cât și în direcția dezvoltării și caracterizării unor noi materiale de fricțiune care au la bază alte fibre naturale.

Activitatea de cercetare mi-a permis asimilarea unor abilități, cunoștințe și aptitudini critice pentru cercetarea fundamentală și aplicativă, cum ar fi: cunoașterea programelor de finanțare disponibile, cunoașterea procesului de realizare a propunerilor de proiecte și granturi, lucrul în echipe multidisciplinare, deosebit de utile pentru coordonarea studenților și a doctoranzilor.

Activitatea științifică se caracterizează prin: Index Hirsch ISI H = 4, Index Hirsch Scopus H = 7 și Index Hirsch Google Scholar H = 9.

1.5 Vizibilitatea și impactul activității desfășurate

Vizibilitatea și impactul activității științifice desfășurate pot fi evaluate în funcție de aprecierile primite atât în țară cât și în străinătate. Articolele, lucrările științifice și cărțile publicate sunt citate atât de autori țară, cât și din străinătate, după cum urmează:

- 59 Citări în reviste și Proceedings ISI;
- 44 Citări în reviste și Proceedings BDI.

Studiile și cercetările efectuate în granturilor AT Cercetări de durabilitate în exploatare a cilindrilor de laminare la cald, Nr.32 940/ 22.06.2004 cod CNCIS 24, Tema 6, Tema 7/2005 și Cercetări și experimentări privind tensiunile termice și echivalente din cilindri de laminare la cald în scopul creșterii duratei lor de viață, Grant AT 58 GR/19.05.2006, cod CNCIS 45, Tema 3, au fost citate în 2 referate de doctorat, 5 teze de doctorat și 3 monografii.

Ca urmare a activității științifice desfășurate am fost invitată la conducerea lucrărilor următoarelor secțiuni la diferite conferințe naționale și internaționale:

- 5th WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering geology EMESEG 2012, Chaimam section: Smart and Adaptive Structure/Engineering mechanics: Theory and Application;
- International Conference on Applied Sciences, ICAS 2020 și 2021; Hunedoara, Romania, Chairman: Mechanical Engineering, Secțiunea Inginerie mecanică;
- International Conference on Analytical & Interdisciplinary Research (ICAIR 2021) Universitatea din Sangam, Rajasthan, India, Secțiunea 4-Inginerie și Tehnologie.

De asemenea, am participat ca profesor invitat în cadrul forumului "Technical Education and Training" DEMO METAL 2017, Arad, Romania, unde am susținut prelegerea cu tema „Implicarea mediului academic în promovarea învățământului superior în contextul Industry 4.0”, iar în anul 2018, am participat la DEMO METAL 2018 cu machete didactice în standul Universității Politehnica Timișoara.

Din anul 2017 și până în prezent sunt membru în comitetul științific al simpozionului International Conference on Applied Sciences - ICAS. Legăturile științifice și colaborările cu membrii unor asociații și societăți profesionale a contribuit la mediatizarea experienței acumulate și facilitează cooperarea științifică cu alte instituții.

În ceea ce privește apartenența la organizații profesionale marcând recunoașterea activității menționez:

- Asociația Generală a Inginerilor din România AGIR;
- Societatea inginerilor de autovehicule din România-SIAR

Activitatea didactică și de cercetare științifică derulate în perioada post-doctorală doresc să le continui și în următoarea perioadă prin antrenarea studenților în programe doctorale care să asigure creșterea vizibilității instituției în care activez atât pe plan științific, cât și pe planul dezvoltării capitalului uman.

CAPITOLUL 2

COMPORTAREA MATERIALELOR DESTINATE FABRICĂRII CILINDRILOR DE LAMINARE LA CALD SUB ACȚIUNEA SOLICITĂRILOR MECANO-TERMICE

2.1 Preliminarii

Materialele au definit întotdeauna nivelul de dezvoltare al civilizației umane, [1]. De-a lungul timpului s-a observat o evoluție continuă a acestora, de la materialele tradiționale, piatră, lut, lemn la cele metalice, iar în ultimii ani la materialele compozite, [2]. Acestea din urmă au cunoscut o dezvoltare rapidă în ultimii cincizeci de ani datorită versatilității lor reprezentând cea mai avansată clasă de materiale concepute și produse de om în epoca modernă, [3]. Dezvoltarea compozitelor are ca scop înlocuirea materialele tradiționale feroase și neferoase care prezintă unele dezavantaje legate de performanțe, procedee de obținere și prelucrare, complexitate geometrică, domenii de utilizare. Deși la ora actuală materialele compozite constituie o provocare pentru viitor în domeniul performanței științifice și tehnice, totuși materialele metalice ocupă ponderea cea mai mare în realizarea de produse destinate diferitelor industrii, [79].

Din punct de vedere al domeniilor de utilizare, cele mai importante materiale metalice sunt oțelurile și fontele, [4,8,10,14,16,57,58]. Acestea sunt materiale feroare tradiționale cu multiple avantaje fizico-mecanice și tehnologice, ele fiind de o importanță majoră într-o multitudine de industrii: petrolieră, navală, constructoare de mașini, aeronautică, autovehicule, etc. [5, 58]. Domeniile vaste de utilizare a acestor aliaje se datorează proprietăților mecanice, care caracterizează comportarea acestor materiale sub acțiunea forțelor exterioare care intervin în exploatare. Aceste proprietăți intervin în cadrul procedeelor tehnologice prin care se realizează forma produselor metalice, respectiv: laminarea, forjarea, așchierea, etc, [3,5,6,10,2,22,24].

Laminarea este procedeul de deformare plastică care se poate realiza la cald sau la rece și care are cea mai mare răspândire în prelucrarea metalelor. Aproximativ 90% din producția de oțel elaborată în industria metalurgică se prelucurează prin laminare, produsele finite obținute fiind: table, bare, profile, țevi, etc. [5–8,10,12,22,24,26,33,37].

Laminarea se realizează prin trecerea forțată a materialului printre doi sau mai mulți cilindri de laminare aflați în mișcare de rotație și care antrenează, prin frecare, materialul metalic în zona în care are loc deformarea. Între cilindrii de lucru ai cajei laminorului se asigură atât modificarea dimensiunilor semifabricatelor, cât și modificări structurale a produselor finite care, la rândul lor, vor determina variația proprietăților mecanice [6-11,19,25-28]. În cazul laminării la cald, se modifică mărimea, forma și proprietățile metalurgice ale materialului metalic, prin comprimarea repetată a acestuia între cilindri de laminare, la temperaturi ce depășesc 1000°C, [12-14, 26, 28, 100, 106-130].

Cilindrii de laminare la cald sunt cele mai importante organe de mașini din componența cajelor de lucru care produc deformarea plastică a metalului, asigurând obținerea formei și a dimensiunilor necesare produsului laminat, [10,12,26,28,112-114]. Diversitatea profilelor laminate impune o multitudine de tipuri de cilindri care se deosebesc după dimensiuni, masă, profilul calibrelor, calitatea materialului din care se realizează și alte elemente ale procesului tehnologic de laminare, [8-10,26-28,112-114,129].

Uzinele metalurgice și cele constructoare de mașini au acumulat o bogată experiență în ceea ce privește fabricarea și exploatarea cilindrilor de laminare pentru care tot mai mult se impun condiții specifice de lucru, datorită creșterii vitezelor de laminare și a prelucrării metalelor și a aliajelor greu deformabile. Utilizarea anumitor procedee de fabricare moderne și folosirea unor materiale superioare în realizarea cilindrilor de laminare se concretizează prin calități superioare ale cilindrilor fabricați. În acest sens, o atenție deosebită trebuie acordată creșterii durabilității în exploatare a acestora, [10,12,17,107,114].

Cilindrii de laminare influențează în mod considerabil producția specifică și nivelul calitativ al laminatelor, motiv pentru care în secțiile de producție se acordă o atenție deosebită, atât la fabricarea, cât și la exploatarea acestora [129,110-115]. Îmbunătățirea calității produselor laminate la cald, pe baza îmbunătățirii calității cilindrilor de laminare, constituie un obiectiv major pentru toate siderurgiile din lume, acest lucru justificând importanța cercetărilor realizate în perioada post-doctorală, [10,26].

Cilindrii de laminare lucrează în condiții de solicitări variabile compuse care se datorează procesului de deformare plastică a metalului incandescent, aflat la temperaturi de 1100...1150°C, solicitări care se produc la intervale regulate de timp și la fiecare rotație a acestora [10,26,100-129].

Metalul care se deformează în timpul laminării are efect de uzură abrazivă asupra cilindrilor, în timp producând degradarea acestora. În afara acestui proces, cilindrii sunt supuși acțiunii tensiunilor compuse, normale și tangențiale generate de forțele de laminare, precum și a tensiunilor produse de variațiile ciclice de temperaturi, la fiecare rotație a acestora. În timp, aceste variații ciclice produc pe suprafața cilindrilor de laminare fisuri care se dezvoltă treptat. Continuând exploatarea, aceste fisuri se dezvoltă, ajungând după un anumit număr de cicluri de solicitare la crăpături care se propagă în secțiunea radială a cilindrilor de laminare, scoțându-i din uz. Pentru a evita acest lucru este necesar să cunoaștem limitele de durabilitate în exploatarea cilindrilor de laminare, în condițiile concrete de solicitare industrială, la un număr mare de cicluri de solicitare, [109,113-117,121,127,131,132].

Cunoașterea durabilității în exploatarea cilindrilor de laminare are o importanță deosebită asupra productivității laminorului, a ritmului de lucru, a calității produselor laminate și a prețului de cost a producției laminate [12,35,38,112-114].

Dezvoltarea tehnologiei construcției cilindrilor de laminare, impune folosirea metodelor moderne de cercetare, în scopul dezvoltării unor materiale noi, cu caracteristici superioare, pentru creșterea duratei de funcționare a acestora, [20,26,28,112-117].

În funcție de fenomenele care au loc în procesul de laminare a metalului, cilindrii trebuie să satisfacă, în principal, următoarele cerințe: rezistență mare la rupere datorită solicitărilor de încovoiere și răsucire, rezistență la uzură, tenacitate, stabilitate la fisurare, respectiv la oboseală termică, prindere bună a barei laminate și o finisare de calitate a suprafeței laminatului, structură omogenă pe lungime și secțiune, durabilitate cât mai mare în exploatarea. De asemenea, cilindrii trebuie să prezinte o structură omogenă pe tăblie, atât pe lungime cât și pe adâncimea calibrelor unde, în special, duritatea trebuie să fie constantă la dimensiunile celui mai adânc calibru care se execută pe cilindru, [10,12,17,18,26,34,112-115]. În acest context trebuie avut în vedere faptul că alegerea corectă a materialului din care se realizează cilindri este o sarcină dificilă care necesită o anumită experiență și reprezintă cel mai important factor al procesului tehnologic de producție din secțiile de laminare [10,22-26,112-114]. În ceea ce privește condițiile pe care trebuie să le satisfacă cilindrii de laminor, acestea se aleg în funcție de cauzele de lucru, linia de laminare, profilul laminatului și de calitatea materialului cilindrilor respectivi, [9,10,16,19,22,26,112-114].

2.2 Analiza cauzelor care duc la ruperea cilindrilor de laminare la cald

Cilindri de laminare se realizează din oțel turnat sau forjat și din fontă. Cilindri din oțel se utilizează atunci când forțele de laminare sunt relativ mari, iar cei din fontă se utilizează acolo unde în procesul de laminare apare ca factor determinant uzura, (se consideră că este cu atât mai mică cu cât duritatea suprafeței de lucru este mai mare), [6-9,11-13,17,21,22,26,29,35,114]. Există însă cilindri care, din punct de vedere al structurii și proprietăților, pot aparține atât grupei cilindrilor din fontă cât și celor din oțel, astfel de cilindri fiind cei turnați din aliaje fier-carbon cu conținut de 1,8–2,6% C, denumiți uzual cilindri de laminare de tip Adamit, [10-13,17,20,23,25-28,38, 92,93, 95,99]. Astfel, până la 2,0% C, acești cilindri aparțin mărcilor de oțeluri turnate, iar la un conținut cuprins între 2,0–2,6% C se consideră că fac parte din categoria fontelor cu conținut scăzut de carbon. Aceștia sunt utilizați ca cilindri de lucru în cajele laminoarelor de profile grele, mijlocii și mici, [9-13,26,27].

Principalele elemente componente ale unui cilindrului de laminare sunt, [7,8,10,12,17,18,22, 26,33,38,114]:

- *tăblia* care produce prin deformare plastică modificarea formei și a dimensiunilor metalului supus laminării;
- *fusurile*, poziționate în ambele părți ale tăbliei care se sprijină pe lagăre și capetele cilindrului;
- *capetele de fus* (treflele) necesare pentru cuplarea cu restul mecanismelor de transmisie.

În vederea analizei cauzelor care au dus la ruperea cilindrilor de laminare, la începutul perioadei post-doctorale am studiat un raport de analiză, aparținând combinatului siderurgic hunedorean care a produs peste 2,2 milioane tone de oțel laminat pe an. În acest raport s-au analizat cauzele ruperilor cilindrilor de laminare, precum și pagubele produse de aceste avarii în laminoarele combinatului, [96,97,114]. Raportul de analiză a cuprins o perioadă de șase luni, iar rezultatele pe tipuri de laminoare sunt prezentate în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1

Numărul cilindrilor ruți în procesul de exploatare a laminoarelor dintr-un combinat siderurgic, pentru o perioadă de șase luni, [114]

Nr. crt.	Denumirea laminorului	Nr. cilindrii rupți [buc.]	Materialul cilindrilor	
1.	Laminor bluming ϕ 1000 mm	1	Oțel aliat forjat	
2.	Laminor ϕ 800 mm	1	Oțel aliat forjat	
3.	Laminor semifabricate ϕ 750 mm	17	Din care:[buc]	
			Oțel forjat	Fontă
			14	3
4.	Laminor ϕ 650 mm	19	Din care:[buc]	
			Oțel forjat	Fontă
			1	18
5.	Laminor profile mijlocii și benzi	16	Din care:[buc]	
			Oțel Adamit	Fontă
			1	15
6.	Laminor profile mici	8	Din care:[buc]	
			Oțel forjat	Fontă
			1	7
7.	Laminor sârmă	10	Din care:[buc]	
			Oțel forjat	Fontă
			-	10
TOTAL		72	Din care: [buc]	
			Oțel forjat	Fontă
			19	53

În acest interval de timp s-au rupt 72 bucăți cilindri în toate laminoarele combinatului. Analiza a fost efectuată pentru fiecare cilindru rupt sub următoarele aspecte: data ruperii, numărul cajei în care a lucrat cilindru, diametrul la care a ajuns calibrul cilindrului, numărul de strunjiri pentru recalibrare, cantitatea de oțel laminat pe fiecare cilindru, consumul de cilindrii în kg/tonă oțel laminat și, în final, cauzele ruperii fiecărui cilindru, [96,97,114].

Din studiul efectuat a rezultat că masa totală a celor 72 bucăți cilindri ruți, în perioada unui semestru de exploatare este de 317,8 tone material metalic. Pagubele produse de ruperile cilindrilor nu s-au rezumat numai la scoaterea lor din exploatare, ci ele s-au extins și asupra pierderilor de producție, raportate prin oțel laminat rebutat din cauza ruperii cilindrilor de laminare. În perioada analizată, în acest combinat siderurgic s-au înregistrat 170,8 tone oțel laminat rebutat prin laminare incompletă, [114].

Analizând cauzele ruperii cilindrilor de laminare s-a constatat că, din cei 72 cilindri ruți, un număr de 26 au fost scoși din uz ca urmare a fisurilor de oboseală termică, fisuri care au înaintat progresiv până la ruperea finală a acestora. Dintre acești cilindri, 4 au fost realizați din oțel forjat, iar 12

turnați din fontă. În același timp, din totalul cilindrilor rupti, 6 au suferit șocuri termice, dintre care 5 au fost turnați din fontă, iar unul a fost executat din oțel forjat, [114].

Ruperea cilindrilor s-a produs prin forfecarea secțiunilor maxime ale acestora, iar cauzele șocurilor termice la care au fost supuși s-au datorat nerespectării tehnologiei de laminare, respectiv neîncălzirii inițiale a cilindrilor la începutul laminării și, în anumite situații, din cauza răcirii insuficiente în exploatare, [114].

Ca urmare a studiului efectuat, 45 % dintre cilindri care s-au rupt în procesul de laminare se datorează regimurilor termice necorespunzătoare, respectiv oboselii termice și a șocurilor termice la care sunt supuși cilindrii în exploatare. Un număr de 18 cilindri de laminare s-au rupt din cauza unor structuri necorespunzătoare și defecte de fabricație, iar un număr de 6 cilindri s-au rupt datorită unor suprasolicitări produse de forțele de laminare care au depășit tensiunile admisibile la încovoiere rotativă, acest lucru fiind generat de materialul supus laminării care a fost introdus între cilindrii la o temperatură sub temperatura minimă de laminare, [114].

Pentru un număr de 16 cilindri cauzele ruperilor au fost diferite, cum ar fi răsucirile, ajungerea laminatului pe cordoanele cilindrilor sau ruperea cordoanelor datorită tensiunilor interne. Unii cilindri din fontă au fost puși în exploatare înaintea finalizării perioadei de îmbătrânire naturală, iar alții ruperea s-a datorat înfășurării laminatului pe cilindrii din cauza retasurii din capul barelor laminate, precum și din alte cauze tehnologice, [114].

Ca urmare a studiului efectuat, s-a ajuns la concluzia că aproape jumătate din cilindrii analizați s-au rupt ca urmare a regimurilor termice necorespunzătoare care au generat apariția fenomenului de oboseală termică, respectiv a șocurilor termice. Din acest motiv, cercetările efectuate în perioada următoare au urmat această direcție.

În fig. 2.1. se prezintă ansamblul calibrului unui cilindru degrositor pe suprafața căruia au apărut fisuri specifice fenomenului de oboseală termică, iar în fig. 2.2. se prezintă aspectul suprafeței unui cilindru pe suprafața căruia au apărut fisuri cauzate de șocurile termice.



Fig.2.1. Calibrul unui cilindru dintr-un laminor degrositor, supus fenomenului de oboseală termică în procesul de laminare la cald

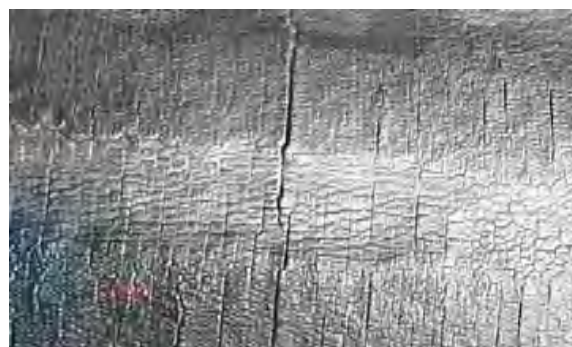


Fig. 2.2. Fisuri circumferențiale pe suprafața unui cilindru de laminare, ca urmare a fenomenului de oboseală termică

În exploatare, fisurile de oboseală termică care apar pe suprafața calibrelor de laminare constituie principala cauză de uzură specifică a acestora, iar șocurile termice reprezintă limita superioară de acțiune a tensiunilor termice, [103,112-114].

În vederea continuării cercetărilor s-a impus alegerea materialelor, oțeluri și fonte, din care sunt realizați cilindri de laminor. În acest sens s-au studiat parametrii constructivi și proprietățile de comportare în exploatare a cilindrilor din cajele de lucru aparținând unui număr de patru laminoare industriale din cadrul aceleiași combinat siderurgic urmărindu-se comportarea lor în 51 caje de lucru, cu un număr de 460 cilindri în exploatare și 1696 cilindri de rezervă, aflați în așteptare în diferite stadii de pregătire. Pentru toți cilindrii aflați în exploatare au fost studiate: forțele maxime de laminare repartizate pe calibre, numărul de rotații al cilindrilor, caracteristici constructive ale acestora, respectiv vitezele de laminare, [114]. În tabelul 2.2 se prezintă rezultatele obținute ca urmare a analizei efectuate pe un număr de 2154 cilindri, [112].

Tabelul 2.2

Studiul asupra cilindrilor de laminare din patru laminoare industriale

Denumire laminor	Nr. caje analizate	Nr. sorturi laminate	Nr. cilindrii studiați			Nr. calibre analizate	Mărci oțeluri și fonte
			În funcț. [buc.]	Rezervă [buc.]	Total cilindri [buc.]		
Laminor de profile grele ϕ 650 mm	3	16	170	416	586	1341	55VMoCr12 90VMoCr15 FNS2
Laminor de profile mijlocii	14	6	118	590	708	3756	OTA 3
Laminor de profile ușoare	20	6	120	480	600	2000	OTA 3 FD2
Laminor de sârmă	14	2	52	208	260	1960	OTA 3 FD2
TOTAL	51	30	460	1694	2154	9058	

În ceea ce privește mărcile de oțeluri și fonte utilizate la realizarea cilindrilor de laminare, acestea sunt restrânse și se rezumă la următoarele calități de oțeluri: 55VMoCr12, 90VMoCr15, 65VMoCr15, OTA3, respectiv fontele FNS2 și FD2, toate aceste materiale fiind utilizate pentru fabricarea cilindrilor celor patru laminoare industriale analizate. Pe lângă acestea, în studiile efectuate s-a mai adăugat o marcă de oțel 65VMoCr15 utilizată pentru fabricarea cilindrilor din laminoarele de semifabricate, [112].

Alegerea calității optime a cilindrilor pentru un anumit scop, presupune o cunoaștere amănunțită a cerințelor pe care aceștia trebuie să le satisfacă, respectiv a condițiilor de lucru și a caracteristicilor diferitelor materiale utilizate pentru fabricarea lor, aceasta fiind o operație dificilă și complexă. Astfel, pentru o alegere rațională a materialului cilindrilor este necesar să se cunoască cauzele cele mai frecvente ale scoaterii din uz a acestora, durabilitatea medie între două restrunșiri, numărul de campanii de laminare, cantitatea laminată pe un calibru, forma și mărimea degradării calibrelor, [10,20,26,28,38,112-114]. Dezvoltarea tehnologiei construcției cilindrilor de laminare, impune folosirea metodelor moderne de cercetare, în scopul obținerii unor materiale noi, cu caracteristici superioare pentru creșterea duratei de exploatare a acestora, acesta fiind un alt deziderat propus în perioada post-doctorală.

2.3 Distribuția câmpurilor de temperaturi pe suprafața cilindrilor de laminare la cald

Procesul de deformare plastică prin laminare la cald este un proces politropic, deoarece o parte din căldură rămâne în metalul care se laminează, iar o altă parte participă la schimbul de căldură cu mediul înconjurător, prin conducție, convecție și radiație [10,17,26,34,38,106,107,112-114].

Sursa principală de căldură din focarul de deformare o reprezintă încălzirea inițială a metalului destinat laminării. O parte din căldură încălzește cilindrul prin conducție, iar o altă parte din această căldură trece din cilindrii în lagăre, de unde este preluată și evacuată de sistemul de ungere sau prin instalațiile de răcire cu apă. Pentru laminarea la cald, în caje se introduc semifabricate încălzite inițial la o temperatură cuprinsă între limitele 1050...1200°C care, în timpul laminării, se răcesc progresiv. Pierderile de căldură se produc în primul rând prin conducție, în contact cu cilindrii de laminare, cu rolele căilor de rulare și cu alte organe de mașini din ansamblul laminorului, prin convecție, cu apa de răcire și aerul din mediul înconjurător și prin radiație. Odată cu răcirea laminatului, în timpul deformării

plastice se produce o oarecare creștere a temperaturii cilindrilor de laminare din cauza lucrului mecanic de deformare din procesul de laminare, precum și din cauza frecării dintre laminat și aceștia, [30-33,114].

Particularitatea laminării la cald constă în aceea că, energia pierdută prin deformare plastică și cea datorată frecării dintre laminat și cilindri, în mod practic se transformă în totalitate în căldură. Temperatura cilindrilor de laminare la cald se modifică în urma rezultatului încălzirii și răcirii concomitente a acestora. Încălzirea cilindrilor se produce în principal datorită energiei primite de la laminatul incandescent și într-un grad mai puțin însemnat datorită căldurii degajate de deformarea plastică a materialului. De obicei, în laminoarele degrositoare și de profile, cilindrii se răcesc cu apă. Condițiile de încălzire și răcire a cilindrilor nu sunt identice pe toată lățimea tăbliei și nu sunt în concordanță nici cu diferitele diametre ale tăbliei cilindrilor de laminare. Anumite porțiuni din tăblia cilindrilor, în mod special cele din apropierea fusurilor, se încălzesc mai puțin decât calibrele de laminare care sunt în contact direct cu laminatul. După un anumit timp de la începerea laminării în caje, asigurându-se un anumit ritm de laminare, cilindrii, ghidajele și alte organe care intră în contact cu laminatul incandescent, se încălzesc, stabilindu-se o temperatură constantă care se modifică numai atunci când se schimbă sortimentul laminat sau ritmul regimului de laminare. În această situație, din punct de vedere termic, cilindri se află în regim staționar sau cvasistaționar, [106,107,114].

În concluzie, asigurarea unui proces normal de laminare este posibil doar prin organizarea unui regim termic corespunzător, care la rândul său este dependent de : rezistența de deformare, viteza de laminare, sistemul de răcire și de alte elemente cu efecte mai puțin însemnate. Cantitatea de căldură transmisă de laminat către cilindri și mediul înconjurător, depinde în principal de temperatura medie a laminatului, de temperatura la care au ajuns cilindrii și mediul înconjurător, precum și de coeficienții de difuzivitate termică, conductivitate termică, convecție și radiație, [6,7,17,21,30-33, 114].

În fig.2.3 se prezintă schema principiului de deformare plastică în procesul de laminare la cald. Laminatul 1 aflat în stare incandescentă la temperatura de 1100...1150 °C se deformează plastic între cilindrii 2 și 3, aceștia fiind răciți cu jeturi de apă 5, pulverizată prin colectoarele 4, pe care sunt montate duzele de pulverizare [17,21,100-109,112-114,118-127].

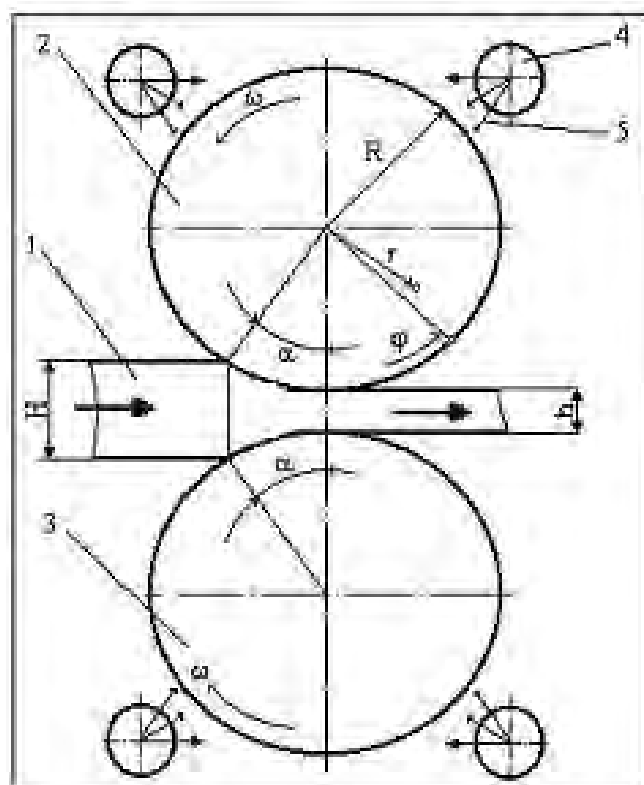


Fig.2.3 Schema principiului de deformare plastică în procesul de laminare la cald

1-laminat, 2,3-cilindri de laminare, 4-colectoare, 5- jeturi de apă

Din analiza procesului de laminare se poate cunoaște principiul de repartizare a câmpului de temperaturi pe suprafața cilindrului de lucru în zona în care se produce laminarea. Astfel, dacă luăm un punct material sau o suprafață elementară pe tăblia cilindrului, aceasta își modifică temperatura în timpul unei rotații în funcție de unghiul " φ " pe care îl parcurge în procesul de laminare. Variațiile de temperaturi din timpul unei rotații a cilindrului se repetă ciclic cu aceleași valori, în condiții identice de exploatare, când cilindrii de laminare ajung în regim termic staționar sau cvasistaționar și cu valori diferite atunci când regimul termic este nestaționar, [17, 28,106-134]. În fig.2.4 se prezintă distribuția câmpului de temperaturi pe suprafața cilindrului de laminare, [17,28,106-109,112-114].

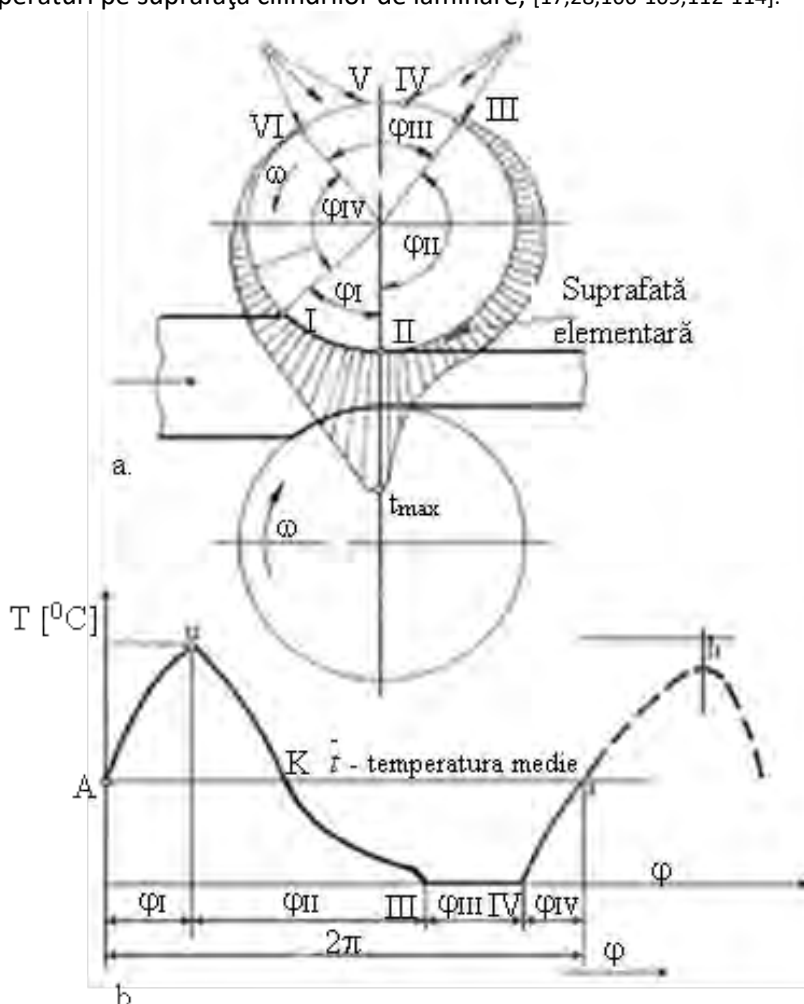


Fig.2.4 Variația temperaturii pe suprafața cilindrului de laminare

*a - reprezentarea temperaturii pe circumferința calibrului de laminare;
b – curba exponențială de variație a temperaturii pe suprafața cilindrului reprezentată într-un sistem de axe de coordonate funcție de unghiul φ desfășurat*

Dacă analizăm variațiile de temperaturi pe o suprafață elementară considerată de pe cilindrul de laminare, care parcurge o rotație completă în timpul laminării, se constată următoarele: în zona unghiului " φ_1 " temperatura crește accentuat fiind maximă în punctul II când părăsește contactul cu laminatul, după care scade în zona unghiului " φ_2 " (II-III), iar în zona unghiului " φ_3 " (III-IV), temperatura acestuia scade până la nivelul temperaturii apei de răcire, după care începe să crească ușor, fiind încălzită prin radiație în zona unghiului " φ_4 " (IV-I). Curba variațiilor de temperatură ale suprafeței elementare a fost trasată pe suprafața cilindrului inferior și apoi reprezentată în coordonate carteziane în fig.2.4b, unde pe abscisă s-a reprezentat unghiul " φ desfășurat", iar pe ordonată temperatura evaluată. Variațiile de temperaturi pe suprafața cilindrului, în perioada unei rotații pentru care unghiul

$\varphi = 2\pi$ radiani au o limită maximă $t_{\max}$, cu valori mai mici decât temperatura laminatului și o limită minimă $t_{\min}$ cu valori apropiate de temperatura apei de răcire, [17,28,100-109, 112-114,118-127, 129]. Variația de temperaturi pe suprafața cilindrilor de laminare reprezentată prin curba exponențială se manifestă în calibrul de laminare pe toată lățimea laminatului, [112-114].

Variația temperaturii pe suprafața cilindrului la o rotație completă este reprezentată printr-o curbă exponențială prezentată în fig.2.5. La adâncimea " δ " în secțiunea radială a cilindrului unde $r = r_{\delta}$, temperatura devine constantă în toată secțiunea cilindrului, aceasta reprezentând *câmpul de temperaturi simetrice* care corespund unui regim termic staționar sau cvasistaționar, [112-114, 118-122,125-127].

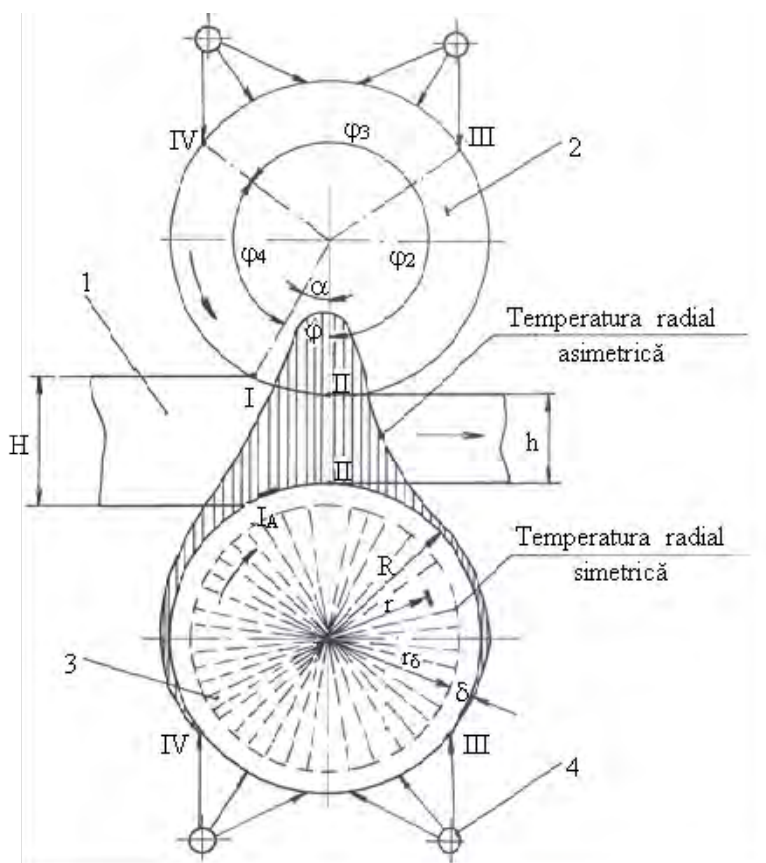


Fig.2.5 Separarea câmpurilor de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor de laminare la cald

1-laminat, 2,3 –cilindri de laminare, 4-colectoare cu duze de pulverizare

Din punct de vedere matematic, curba variației de temperatură pe suprafața cilindrului este descrisă de o funcție matematică dependentă de unghiul " φ ", a cărei integrală reprezintă o dreaptă, denumită temperatura medie $\bar{t}$, conform reprezentărilor din fig.2.6.

Valoarea acestei temperaturi medii se poate determina prin intermediul relației de aproximare a lui Simpson, [17,21,22,28,31,100-128]:

$$\bar{t} = \frac{1}{2\pi - 0} \int_0^{2\pi} f(\varphi) d\varphi = \frac{2\pi - 0}{6n} \{ f(0) + f(2\pi) + 4[f(\varphi_1) + f(\varphi_3) + \dots + f(\varphi_{2n-1})] - 2[f(\varphi_2) + f(\varphi_4) + \dots + f(\varphi_{2n-2})] \} \quad (2.1)$$

În care: t – temperatura variabilă descrisă de curba exponențială pe suprafața sau în secțiunea

radială la diferite nivele în cilindrii de laminare;

r - rază oarecare măsurată în secțiunea cilindrului;

τ - timpul în care se efectuează laminarea;

n – numărul de diviziuni de pe abscisă.

Rezolvarea numerică a relației (2.1) nu comportă dificultăți deoarece se pot cunoaște curbele variațiilor de temperaturi pe care le vom determina experimental.

În fig.2.6, dreapta care reprezintă valoarea temperaturii medii „ $\bar{t}$ ”, intersectează curba exponențială a variației de temperatură în punctul K, delimitând pe abscisă unghiul „ φ_i ” și unghiul „ φ_e ”, [17,28,107-114,118-120,126,127]. Astfel pentru regimul termic staționar sau cvasistaționar al cilindrului, în intervalul unghiului „ φ_i ” se introduce în cilindru cantitatea de căldură Q_i , iar în intervalul unghiului „ φ_e ” se realizează evacuarea din cilindru a cantității de căldură Q_e . Având în vedere aceste aspecte pentru regimul staționar de exploatare se poate scrie relația, [17,28,107-114,122,126-127]:

$$Q_i = Q_e \quad (2.2)$$

Fluxul de căldură introdus în cilindru este direct proporțional cu temperatura și reprezintă fluxul de căldură care se află în cilindru în timpul parcurgerii unghiului „ φ_i ”, când temperatura este mai mare decât „ $\bar{t}$ ”, iar fluxul de căldură evacuat reprezintă, fluxul de căldură care este degajat în mediul de răcire în timpul parcurgerii unghiului „ φ_e ”, când temperatura este mai mică decât temperatura medie „ $\bar{t}$ ”. În aceste condiții $\varphi_i + \varphi_e = 2\pi$ rad, iar cele prezentate anterior se referă la o rotație completă a cilindrului de laminare, [17,28,107-115,126].

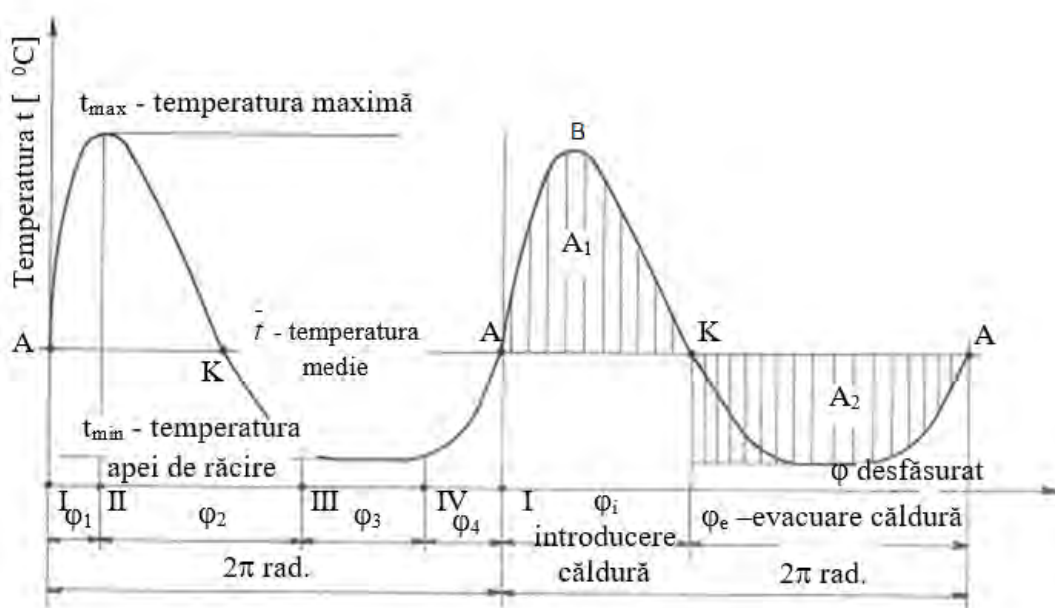


Fig.2.6 Determinarea valorii temperaturii medii după curba exponențială a variațiilor de temperature pe suprafața sau în secțiunea cilindrului de laminare

În partea superioară a dreptei care reprezintă temperatura medie „ $\bar{t}$ ”, deasupra segmentul A-K, se delimitează suprafața A_1 , care este egală cu suprafața A_2 , aflată sub linia temperaturii medii, segmentul K-A și curba $f(\varphi)$ determinând suprafețele egale, [17,30,31,100,103,107-115]:

$$A_1 = A_2 \quad (2.3)$$

$$A_1 = \frac{\varphi_i - 0}{6k} \{ f(0) + f(\varphi_i) + 4[f(\varphi_1) + f(\varphi_3) + \dots + f(\varphi_{2k-1})] - 2[f(\varphi_2) + f(\varphi_4) + \dots + f(\varphi_{2k-2})] \}; \quad (k = 1, 2, 3) \quad (2.4)$$

$$A_2 = \frac{2\pi - \varphi_i}{6z} \{ f(\varphi_1) + f(2\pi) + 4[f(\varphi_1) + f(\varphi_3) + \dots + f(\varphi_{2z-1})] + 2[f(\varphi_2) + f(\varphi_4) + \dots + f(\varphi_{2z-2})] \} \quad (2.5)$$

Variațiile de temperaturi pe suprafața cilindrului de laminare și în secțiunile radiale ale acestora pot fi studiate și în formă adimensională, aceasta permițându-ne să extindem raționamentul și

experimentările la toate tipurile de cilindri de laminare, din caje degrositoare și de profile, prin utilizarea temperaturii specifice „ θ ” care poate fi determinată cu relația (2.6), [17,21-22,28,30,107-114,118-120,122].

$$\theta = \frac{t - t_{\min}}{t - t_{\max}} \quad (2.6)$$

În care: t – temperatura variabilă a unei suprafețe elementare de pe suprafața calibrului;

$t_{\min}$ – temperatura suprafeței cilindrului în zona unghiului φ_{III} care are un nivel apropiat de cel al apei de răcire;

$t_{\max}$ – temperatura suprafeței cilindrului în punctul II de contact cu laminatul incandescent, cu o temperatură mai mică decât a acestuia.

Temperatura specifică are valori cuprinse între 1 și 0 respectiv $\theta_{\max}=1$ și $\theta_{\min}=0$.

$$\text{Pentru } t = t_{\max}, \quad \theta = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} = 1$$

$$\text{Pentru } t = t_{\min}, \quad \theta = \frac{t_{\min} - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} = 0$$

În cazul regimului termic nestaționar, respectiv nestabilizat, temperatura medie „ $\bar{t}$ ” sau dacă ne referim la temperatura medie specifică „ $\bar{\theta}$ ” sunt variabile la fiecare rotație a cilindrului de laminare și la trecerea prin cajele de lucru a fiecărui laminat. În regim termic staționar sau cvasistaționar, această temperatură rămâne cu valori constante în condiții de laminare identice, [17, 28,107-114,118-120,127].

Variațiile de temperaturi care depășesc nivelul temperaturii medii „ $\bar{t}$ ” sau nivelul temperaturii specifice medii „ $\bar{\theta}$ ” reprezintă *câmpul de temperaturi asimetrice*. Aceste variații se referă la fiecare rotație a cilindrului de laminare și crează tensiuni termice asimetrice care se produc ciclic și în cercetările ulterioare vom demonstra că sunt producătoare de oboseală termică. Câmpul de temperaturi asimetric este determinat de curba variațiilor de temperaturi până în punctul A (fig.2.6), acesta având valoarea maximă în punctul B, astfel încât pe anumite porțiuni din suprafața cilindrului, temperatura este maximă, iar pe alte porțiuni are o valoare minimă. La o anumită adâncime de la suprafața cilindrului, acest câmp asimetric de temperaturi, devine aproape imperceptibil, astfel încât pe o anumită adâncime de la suprafața cilindrului el devine numai radial simetric pe toată lățimea laminatului, [17,28,101,112-114,119,122].

Cercetările experimentale efectuate pe parcursul a zece ani au dovedit că, variațiile câmpurilor asimetrice de temperaturi în secțiunea radială a cilindrilor degrositori se atenuează în zona stratului de suprafață la o adâncime $\delta = 15...30$ mm conform reprezentărilor din fig.2.5. Astfel, stratul superficial al cilindrului de laminare, cuprins între raza R și $r_{\delta} = R_{\delta}$, reprezintă suprafața din secțiunea radială în care acționează câmpurile asimetrice de temperatură. Separarea câmpului de temperaturi, în câmp radial simetric și asimetric, se face nu numai pentru studierea separată a acestor câmpuri de temperaturi, ci și pentru determinarea și studiul tensiunilor termice și a efectelor produse de acestea. De asemenea, au existat preocupări pentru găsirea unor modele matematice de distribuție a temperaturii în cilindri de laminare, precum și utilizarea tehnicii electronice de calcul, în scopul găsirii unor relații exponențiale pentru curbele de variație a temperaturii din cilindri de laminare la cald, [112-114].

În vederea confirmării celor anterior prezentate, curbele de variație a temperaturii, pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor de laminare la cald au fost determinate experimental pe un laminat de cercetare din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara, rezultatele experimentale fiind prezentate în capitolele următoare.

2.4 Concluzii

Din studiile efectuate și cuprinse în acest capitol se desprind următoarele concluzii:

- variațiile de temperaturi la care sunt supuși cilindri de laminare au un caracter ciclic care se repetă la fiecare rotație a cilindrilor de laminare;
- cele mai accentuate efecte ale oboselii termice se manifestă la cilindrii cajelor degrositoare;

- cilindrii de laminare la cald se distrug, în timp, printr-un sistem de fisurare specifică sub acțiunea preponderentă a tensiunilor termice;
- fisurarea specifică prin oboseală termică cu nuanțe de crăpături este produsă sub acțiunea tensiunilor termice, rezultate din variația câmpurilor de temperaturi simetrice și asimetrice care apar în timpul procesului de exploatare a cilindrilor de laminare;
- tensiunile termice sunt influențate de următorii factori: temperatura de laminare, viteza de laminare, numărul de rotații al cilindrilor diametrul cilindrilor, lungimea laminatului, durata pauzelor din timpul procesului de laminare; masa laminatului în comparație cu masa cilindrilor de laminare;
- fenomenul de oboseală termică se manifestă asupra cilindrilor de laminare la cald prin apariția unor fisuri circumferențiale și longitudinale cu aspect specific;
- separarea câmpului de temperaturi, în radial simetric și asimetric, are importanță pentru determinarea tensiunilor termice și a efectelor produse de acestea;
- cunoașterea nivelului de tensiuni termice are importanță majoră în evitarea apariției fenomenului de oboseală termică.

CAPITOLUL 3

STUDIUL REGIMULUI TERMIC AL CILINDRILOR DE LAMINARE LA CALD

3.1 Importanța studiului regimului termic al cilindrilor de laminare la cald

Cercetările privind regimul termic al cilindrilor utilizați la laminarea la cald reprezintă o problemă importantă atât din punct de vedere al științei fundamentale, teoretice și experimentale, cât și din punct de vedere economic, [17,30,102,105,109,112-114,118,123].

Metodele clasice de evaluare a durabilității cilindrilor de laminare la cald nu iau în considerare multe dintre fenomenele care apar în procesul de laminare, între cilindrii și laminat. Aceste metode neglijează influențele termice extrem de importante, care constituie una dintre cauzele fundamentale care conduc la distrugerea cilindrilor de laminare la cald, influențe termice care pot atinge valori considerabile ce pot fi observate doar prin experimente. Până în prezent, mai multe aspecte ale regimului termic al cilindrilor de laminare la cald au fost studiate mai puțin detaliat, astfel că nu există metode eficiente de determinare și reglare a temperaturii acestora în laminare industriale. Lipsa cercetărilor detaliate, teoretice și experimentale asupra proceselor termo-mecanice care au loc în timpul deformării plastice din cilindrii de laminare la cald, constituie un factor care reduce posibilitățile de exploatare rațională a laminoarelor industriale. În contextul economiei de piață este necesară o evoluție în domeniul cercetării științifice, în vederea modernizării echipamentelor metalurgice, folosind cele mai eficiente soluții pentru obținerea unor cilindri performanți la scară internațională, [17,28,107-128].

Cunoașterea efectelor negative, care duc la distrugerea cilindrilor de laminare impune o cercetare teoretică și experimentală detaliată, complexă, asupra tensiunilor termice prezente în procesul de laminare la cald. Deși solicitarea cilindrilor de laminare este un caz tipic de solicitare variabilă, calculele clasice de rezistență se bazează doar pe solicitarea statică, fără a lua în considerare influențele termice la dimensionarea acestora. Pentru cunoașterea tensiunilor termice care apar în exploatarea cilindrilor de laminare este necesar să cunoaștem regimul termic al acestora. În acest sens, acest capitol prezintă echipamentele experimentale cu ajutorul cărora se determină variațiile de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor de laminare la cald, precum și determinarea experimentală a acestora în două variante, [12,26,28,106-107,112-114,118]:

- prin oscilografiera procesului de laminare;
- utilizând module analogice și tehnica electronică de calcul.

De asemenea, pentru analiza distribuției temperaturilor în cilindrii de laminare la cald a fost realizat un model matematic care confirmă datele obținute în experimentările efectuate.

Cunoașterea variațiilor de temperaturi din cilindri de laminare la cald fac posibilă cercetarea durabilității și a stabilității diverselor mărci de oțeluri și fonte din care aceștia sunt fabricați, acest lucru justificând cercetările efectuate în acest sens, [106,107,114,115,123,127].

3.2. Studiul în laborator a regimului termic a cilindrilor de laminare la cald

Studiul experimental al regimului termic al cilindrilor de laminare la cald a avut ca scop evidențierea variațiilor de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a acestora, [17,28,100,109-114, 127, 129].

Datorită condițiilor de exploatare, a siguranței totale în funcționarea laminoarelor industriale existente, precum și datorită operațiilor îndelungate și dificile din punct de vedere tehnic pentru pregătirea determinărilor experimentale, studiul regimului termic nu a fost posibil să se realizeze în condiții industriale. În acest scop a fost conceput și realizat un laminor degrositor experimental în cadrul laboratorului de “Sisteme mecanice industriale” de la Facultatea de Inginerie din Hunedoara, [17,28, 109-114,118].

Datorită utilizării tot mai frecvente a instalațiilor de turnare continuă, laminoarele bluming au fost dezafectate parțial și în mare parte sunt trecute în conservare. Cu toate acestea, cercetările efectuate asupra cilindrilor din laminoarele blumig au rămas de actualitate, deoarece distrugerea cilindrilor de laminare sub acțiunea fenomenului de oboseală termică se manifestă asupra tuturor cilindrilor, din toate tipurile de laminoare. Evidențierea acestui fenomen este mai ușor de studiat la cilindrii din laminoarele degrositoare, unde vitezele de laminare sunt mici și masa laminatului este mare, comparativ cu cilindrii altor laminoare. Fenomenul de oboseală termică apare nu numai la cilindrii de laminare la cald, ci și la rolele de ghidare amplasate sub cristalizorul instalațiilor de turnare continuă. Acest fenomen poate apărea și la alte organe de mașini care sunt supuse în timpul funcționării unor variații ciclice de temperaturi, acest lucru justificând importanța cercetărilor efectuate, [112-114].

3.2.1 Prezentarea instalațiilor experimentale

3.2.1.1 Laminorul degrositor experimental

Studiul regimului termic al cilindrilor de laminare cald s-a realizat pe un laminor experimental cu diametrul nominal al cilindrilor ϕ 220 mm, conceput și realizat în vederea desfășurării acestor cercetări în condiții de laborator. Acesta corespunde tuturor parametrilor laminoarelor integrate în procesul tehnologic de producție industrială din cadrul combinatului siderurgic hunedorean, realizat la scara 1:5 față de un laminor degrositor. În fig.3.1 se prezintă ansamblul laminorului experimental împreună cu utilajele aferente, [17,28,100,106,107,109-114,118-127].



Fig.3.1 Ansamblul general al laminorului degrositor experimental, destinat studiului regimului termic al cilindrilor de laminare la cald

În fig.3.2 se prezintă schema de amplasare a utilajelor în ansamblul laminorului experimental. Acest laminor are posibilitatea laminării lingourilor cu dimensiuni de 115/130x144/196x690 mm sau a țagălelor pătrate 120 x 120 mm și produce profile pătrate cu secțiunea minimă 46 x 46 mm². În componența acestui laminor se prezintă caja 1 care este acționată de un motor electric de curent continuu cu puterea de 25,8 kW și turația $n = 575 \dots 1800$ rot/min. De la motor, mișcarea se transmite reductorului 3 care are raportul de transmitere $i = 3,1$ și care antrenează caja de angrenaj 2, respectiv barele de cuplare. Mișcarea de rotație se transmite astfel cilindrilor de laminare, care au în fața și în spatele cajei de lucru liniarele 5 și 7, dispuse în stânga, respectiv în dreapta. Ansamblul laminorului mai cuprinde căile cu role 4 și 6, cu rol de alimentare cu semifabricate, respectiv evacuare a produselor laminate. Acestea sunt inițial încălzite într-un cuptor și manevrate cu o macara cu clește vertical existentă în dotarea laboratorului, [17,100,107,109,112-114].

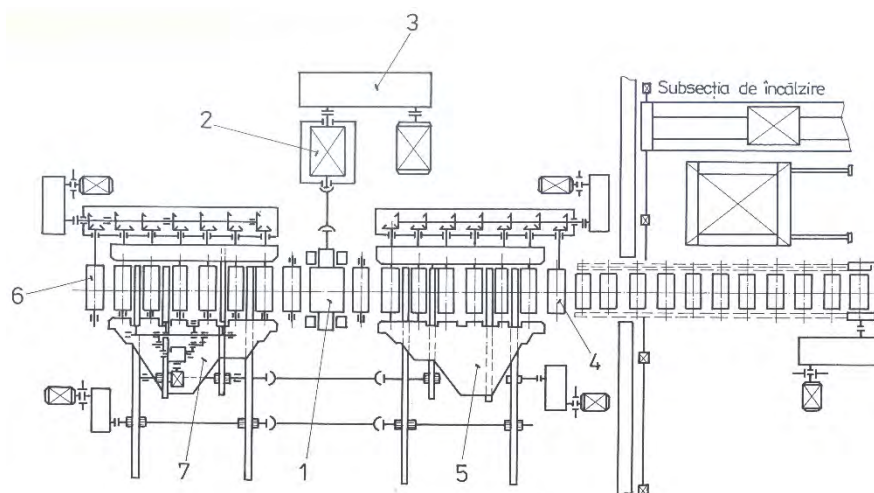


Fig.3.2 Schema de amplasare a utilajelor în ansamblul laminorului experimental
 1-caja, 2-caja de angrenaj, 3-reductor, 4,6-cale cu role, 5,7-liniare

Ansamblul cajei de lucru din laminorul degrosisor experimental are cilindrii montați în portlagăre și lagăre cu rulmenți radiali axiali, iar cilindrul superior este echilibrat prin intermediul a două arcuri elicoidale. Mecanismul de poziționare a cilindrului superior este acționat de un motor electric prin intermediul unui reductor melcat, care permite transmiterea mișcării la două șuruburi de presiune. Ansamblul general al cajei laminorului se prezintă în fig.3.3. Parametrii principali ai cajei sunt: diametrul cilindrilor de laminare la cald este de 220 mm, puterea motorului electric 37 kW c.c, numărul de rotații al cilindrilor de laminare $n = 0 \dots 250$ rot/min, [17,100,109,112-114,118].



Fig.3.3 Ansamblul cajei laminorului

Analiza regimului termic al cilindrilor de laminare la cald s-a realizat:

- prin determinarea variațiilor de temperaturi folosind un oscilograf H115;
- prin determinarea variațiilor de temperaturi utilizând module analogice și tehnica electronică de calcul.

3.2.1.2 Instalația pentru determinarea variațiilor de temperaturi prin oscilografiera procesului de laminare

Determinarea regimului termic al cilindrilor de laminare s-a realizat pe o instalație adaptată laminorului experimental care funcționează pe principiul efectului termoelectric în termocuple. Acestea sunt montate într-un bolț conic, la adâncimile $\Delta r = 0,2; 1,5; 3,0$ mm în cilindrul de laminare superior al

laminorului degrosisor experimental. Primul termocuplu este situat la adâncimea de $\Delta r = 0,2 \text{ mm}$ și are rolul de a determina variațiile de temperaturi de pe suprafața cilindrului de laminare. Schema constructivă a cilindrului de laminare împreună cu bolțul pentru implantarea termocuplelor se prezintă în fig.3.4, [17,106-108,112-120].

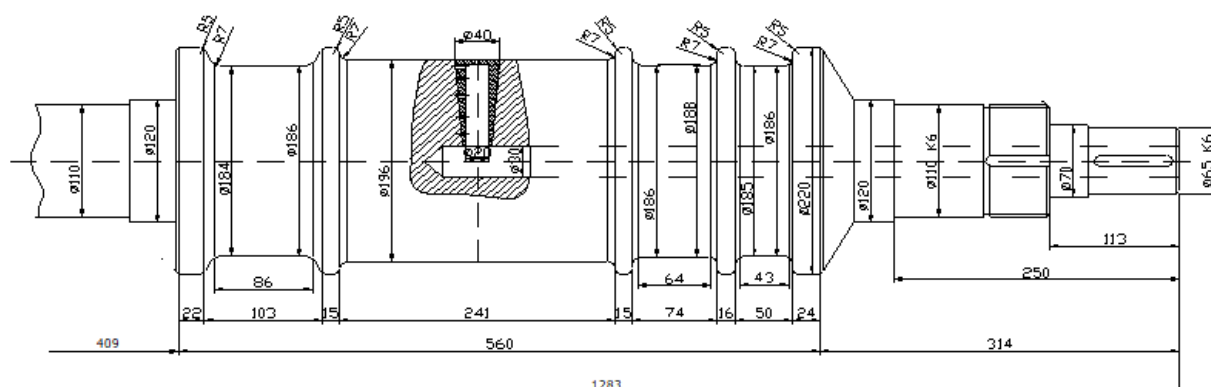


Fig.3.4 Schema constructivă a cilindrului din laminorul degrosisor experimental în care s-a montat bolțul pentru implantarea termocuplelor

În fig.3.5 se prezintă schema instalației pentru determinarea variațiilor de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrului de laminare, prin oscilografare, utilizând oscilograful H115. Bolțul 1 împreună cu termocuplele 3, sunt montate în cilindrul 2, iar conductorii termocuplelor trec prin orificiul executat în axa cilindrului, la discurile 5 ale colectorului de termotensiune. Acestea asigură transmiterea termotensiunii de la inelele colectoare 7 la periile de cărbune 6, de unde acestea ajung la cutia de borne 9. Legătura dintre cilindrul 2 și colectorul de termotensiune este realizată prin intermediul cuplajului rigid 8. Cutia de borne 9 este cuplată la oscilograful 10 la care s-au utilizat bucle tip MO 10 – 20, [17,106-107,109, 114].

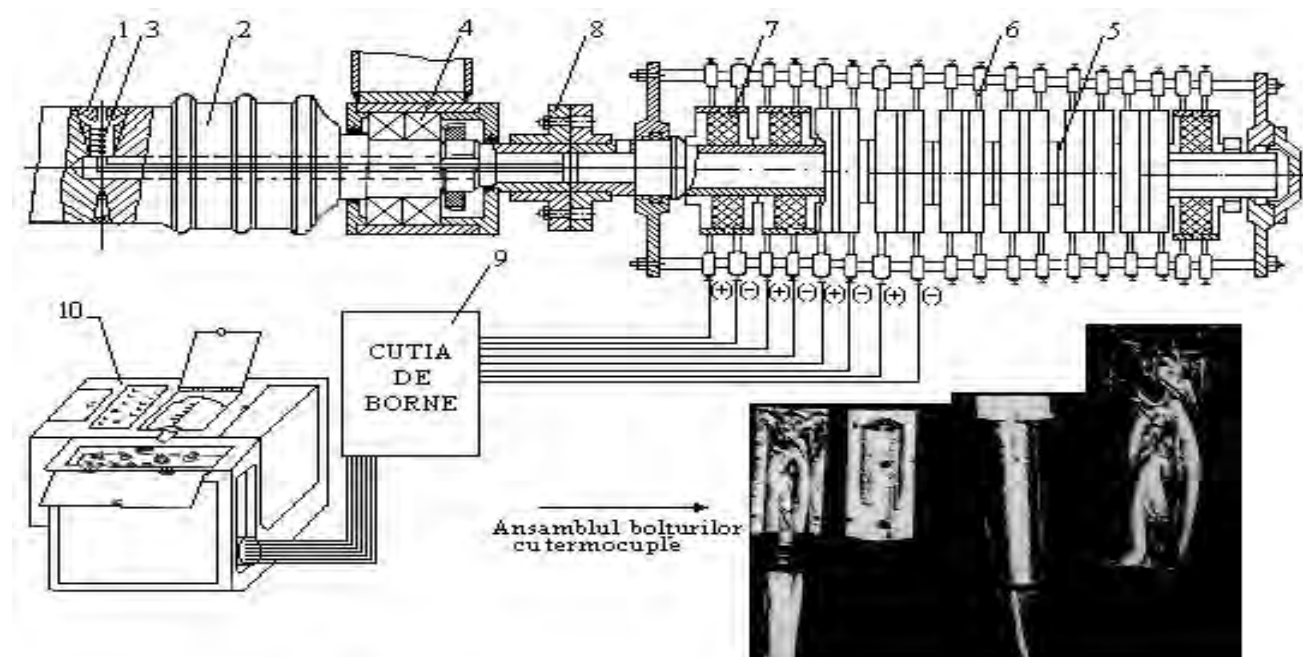


Fig.3.5 Schema instalației pentru determinarea variațiilor de temperatură pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrului de laminare, prin oscilografare

1-bolț, 2- cilindru de laminare, 3 - termocuple, 4-colector de termotensiune, 5 discurile colectorului de termotensiune, 6-perii de cărbune, 7-inele colectoare, 8-șuruburi 9- cutia de borne, 10-oscilograf H115

Elementul de bază în măsurarea variațiilor de temperaturi îl constituie alegerea termocuplelor având în vedere asigurarea inerției semnalului de răspuns al acestora. Termocuplele alese sunt de tipul 90Pt–10Rh/Pt, având diametrul sârmei de 0,06 mm, iar inerția termică de răspuns pentru intervalul de temperatură 50...900°C este 0,08s, un timp care satisface pe deplin condițiile de cercetare, [17,112,109, 114,118].

3.2.1.3 Instalația pentru determinarea variațiilor de temperatură utilizând module analogice și tehnica electronică de calcul

În acest subcapitol se prezintă instalația pentru determinarea experimentală a regimului termic al cilindrilor de laminare la cald utilizând module analogice și tehnica electronică de calcul. Experimentările s-au realizat cu ajutorul laminorului experimental descris la subpunctul 3.2.1.1, utilizând o instalație adaptată în acest scop, [17,109,112-114,118].

În fig.3.6 se prezintă schema constructivă a instalației pentru determinarea variațiilor de temperaturi în cilindrii de laminare, folosind module analogice. În această figură se observă utilizarea bolțurilor conice cu termocuplele 1, montate în cilindrii de laminare 2 și cutia de conexiuni 12 cu module analogice de tip ADAM conectate la un calculator electronic IBM PC 14. Principiul de lucru al instalației este asemănător variantei prin oscilografare. Termotensiunile produse de termocuple s-au transmis la cutia de borne 9, cutie preia și semnalele primite de la mesdoza 10 și tahogeneratorul 11. Prin intermediul unei mufe de legătură, semnalele din cutia de borne au fost transmise spre cutia de conexiuni, iar de aici semnale au fost preluate de sistemul de calcul electronic 14, [112-114,118].

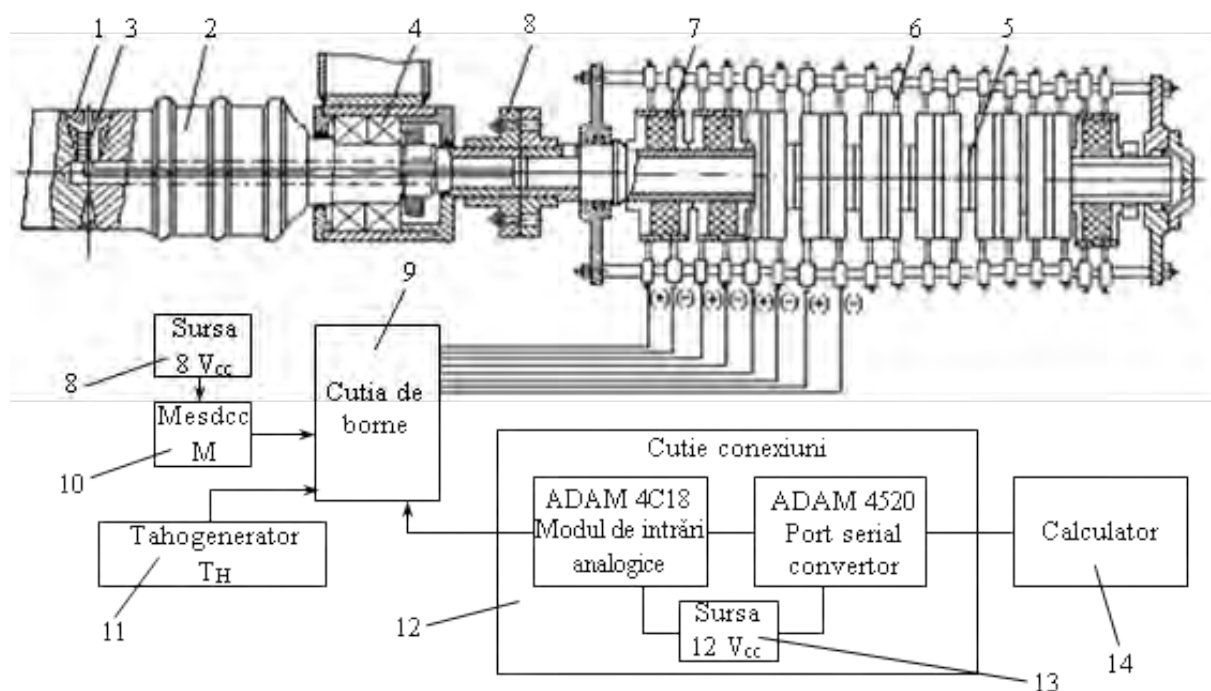


Fig.3.6 Schema constructivă a instalației pentru determinarea variațiilor de temperatură în cilindrii de laminare, folosind tehnica electronică de calcul

Termocuplele utilizate au fost 90Pt–10Rh/Pt și au fost introduse în interiorul cilindrului superior la adâncimile $\Delta r = 0,2; 1,5; 3,0$ și $6,0$ mm de la suprafața cilindrului. În fig.3.7 se prezintă ansamblul laminorului echipat în vederea determinării regimurilor termice ale cilindrilor de laminare utilizând ca metodă de achiziție a datelor modulele analogice și tehnica electronică de calcul. În fig.3.8 se prezintă modulele analogice cu ajutorul cărora s-au efectuat determinările experimentale.



Fig.3.7 Ansamblul laminorului experimental echipat cu module analogice

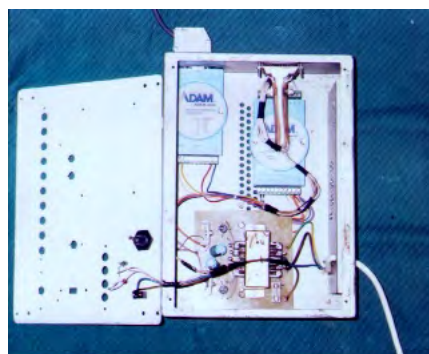


Fig.3.8 Module analogice ADAM4018 și ADAM4520

3.2.1.4 Instalația pentru determinarea forțelor de laminare

În exploatare, cilindrii de laminare sunt supuși la tensiuni complexe de natură mecanică și termică. În vederea calculului tensiunilor de natură mecanică este necesar să se cunoască forțele care apar în procesul de laminare. În acest scop s-a proiectat și realizat o instalație care permite măsurarea forțelor de laminare din cadrul laminorului experimental aflat în dotarea laboratorului de "Sisteme mecanice industriale" de la Facultatea de Inginerie din Hunedoara. Ideea instalației poate fi folosită și pentru măsurarea forțelor de laminare din cadrul laminoarelor industriale. Măsurarea forțelor de laminare s-a realizat cu ajutorul tensiometrelor cu traductoare rezistive, montate între cuzineții axiali din capul șuruburilor de presiune și portlagărele cilindrului superior. În fig.3.9 se prezintă tensiometrului pentru măsurarea forțelor de laminare din ansamblul laminorului experimental, [17,106-109,112-114,128,134].

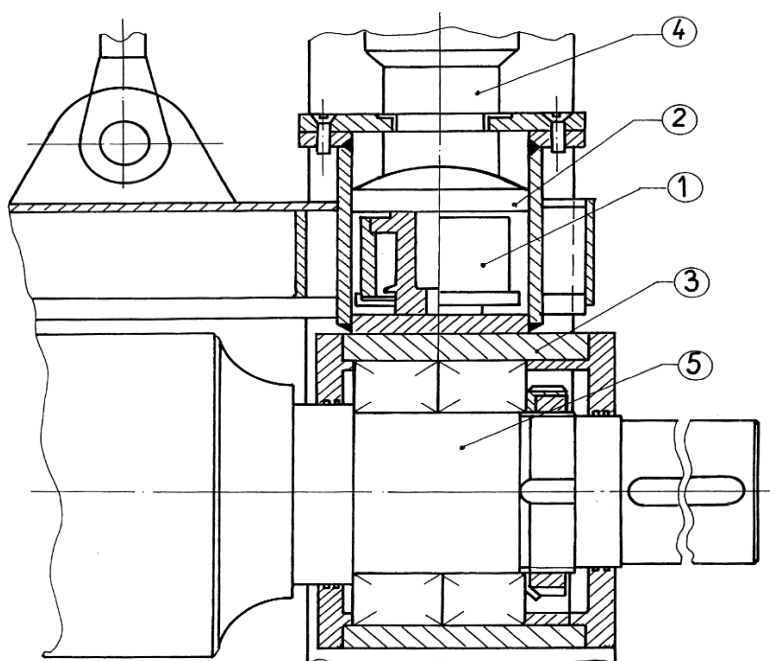


Fig.3.9 Montajul tensiometrului cu traductori rezistivi în casa laminorului experimental
1-tensiometru, 2-cuzinet axial, 3-port-lagăr, 4-șurub de presiune, 5-cilindru de laminare

Forțele de laminare sunt transmise prin cilindrul 5 și portlagărul 3 spre tensiometrul 1. Acesta este amplasat într-o cutie metalică rigidizată cu traversa de legătură de arcurile de echilibrare a cilindrului superior. După schema de laminare pentru o secțiune pătrată de $46 \times 46 \text{ mm}^2$, obținută cu reducerea maximă fără restricționarea lății s-a calculat forța de laminare maximă și reacțiunile din lagăre. În funcție de valoarea maximă a forței de laminare s-a ales materialul corpului elastic al tensiometrului, Arc 2 cu caracteristicile prezentate în tabelul 3.1, [114].

Tabelul 3.1

Caracteristicile materialului corpului tensiometrului

Modulul de elasticitate longitudinal E [N/mm ²]	Tensiunea de rupere σ_R [N/mm ²]	Tensiunea de curgere σ_c [N/mm ²]
$2,1 \cdot 10^5$	1275	1177

În fig.3.10 se prezintă schema constructivă a corpului elastic al tensiometrului, iar în fig.3.11 ansamblul tensiometrului pregătit pentru montaj în caja de lucru, [128,134].

Etalonarea instalației pentru măsurarea forțelor de laminare din laminorul degrositor experimental s-a efectuat pe o presă la care s-au aplicat treptat forțe de compresiune prestabilite, măsurându-se de fiecare dată tensiunile în milivolți înregistrate de o punte tensometrică Wheatstone. Rezultatele etalonării sunt prezentate în lucrarea [114], monografie la care subsemnata este coautor.

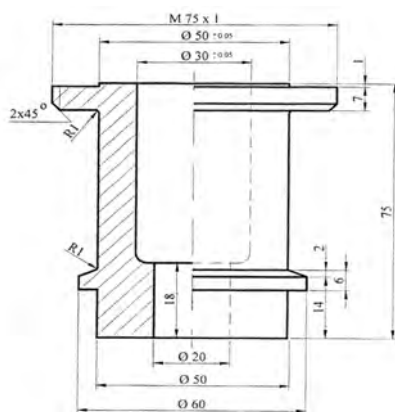


Fig.3.10 Schema constructivă a corpului elastic din componența tensiometrului



Fig.3.11 Ansamblul tensiometrului pregătit pentru montaj în caja de lucru a laminorului

3.2.2 Operații pregătitoare în vederea laminării experimentale

Cilindrii din cadrul laminorului experimental au fost pregătiți și echipați corespunzător în vederea efectuării determinărilor experimentale. În acest sens, ei au fost executați din același material ca și cei industriali. Materialul cilindrilor este un oțel aliat, forjat pentru care compoziția chimică, caracteristicile mecanice și proprietățile fizice se prezintă în tabelul 3.2, [17,114].

Tabelul 3.2

Caracteristicile materialului cilindrilor de laminare experimental și industriali, rezultate pe baza analizelor și determinărilor de laborator

Compoziția chimică [%]									
C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Ni	Mo	V	Cu
0,63	0,53	0,64	0,017	0,014	1,17	0,08	0,20	0,11	0,12
Proprietăți mecanice									
Duritate [HB]		σ_r [daN/mm ²]		σ_c [daN/mm ²]		σ_{-1} [daN/mm ²]		K [daN m/cm ²]	
tăblie	fus	long.	tang.	long.	tang.	long.	tang.	long.	tang.
290	270	78	71	43	39,1	31,7	30,6	1,31	1,01
Proprietăți fizice									
Difuzibilitatea termică		$a = \lambda/\gamma c = 46,3 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{h}$		Coeficient de conducivitate termică		$\lambda = 45,4 \text{ W/m}^\circ\text{K}$			
Căldura specifică		$c_p = 4,6 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{K}$		Modul de elasticitate		$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ daN/cm}^2$			
Coeficient de dilatare liniară		$\alpha = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$		Coeficient de contracție transversală		μ			

Semifabricatele utilizate la laminarea experimentală au fost lingouri model, turnate din oțel carbon, având dimensiunile 114/130 x 144/169 x 600 mm. Înainte de laminare, cilindri au fost încălziți în mod uniform cu flacăra cu gaze naturale până la temperatura de 100°C, [17,102,104,112-114].

Turațiile cilindrilor experimentali de laminare s-au determinat statistic după numărul de rotații al cilindrilor din laminoarele industriale. Astfel, în cazul cajele degrositoare și pregătitoare, valoarea medie a turației este de $n_1 = 35,7$ rot/min, iar pentru cajele prefinisoare și finisoare a rezultat $n_2 = 93,0$ rot/min. În ceea ce privește laminoarele de semifabricate, profile și sârmă, cele mai frecvente nivele ale vitezelor de laminare, la care a apărut fenomenul de oboseală termică corespunde unor turații ale cilindrilor cuprinse între limitele 32,5 rot/min și 226,4 rot/min, [17,104,107-128]. Pentru a nu fi influențat caracterul variației exponențiale a câmpurilor de temperaturi care este în funcție și de numărul de rotații al cilindrilor s-au înregistrat variațiile de temperaturi în cilindri de laminare la viteze unghiulare constante, numite *stări izocrone în cilindri*. Înregistrarea variațiilor câmpurilor de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor experimentali de laminare s-a făcut pentru situația când aceștia s-au aflat în regim termic staționar, atunci când aparatele instalației de reglare a temperaturii s-au aflat în echilibru termic, [17,104,112-114].

3.3 Determinări experimentale ale variațiilor de temperaturi prin oscilografierea procesului de laminare

Determinările experimentale ale variațiilor de temperaturi au fost efectuate atât pe suprafața cilindrului, cât și în secțiunea radială a acestuia la adâncimile de 1,5 și 3 mm pentru viteze unghiulare constante, corespunzător stărilor izocrone, având turațiile de 35,7 rot/min, respectiv 93,0 rot/min. Oscilogramele înregistrate se prezintă în fig.3.12 și fig.3.13. În aceste oscilograme s-au înregistrat simultan cu curbele de variație a temperaturilor și numărul de rotații al cilindrilor de laminare și forțele de laminare, [103-105, 109-114,120]. Determinarea variațiilor de temperaturi la suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor de laminare s-a realizat și pentru alte trei stări izocrone de temperaturi, corespunzătoare turațiilor de 43 rot/min, 50 rot/min și 100 rot/min, rezultatele fiind prezentate în lucrările [100-105, 109, 114-118].

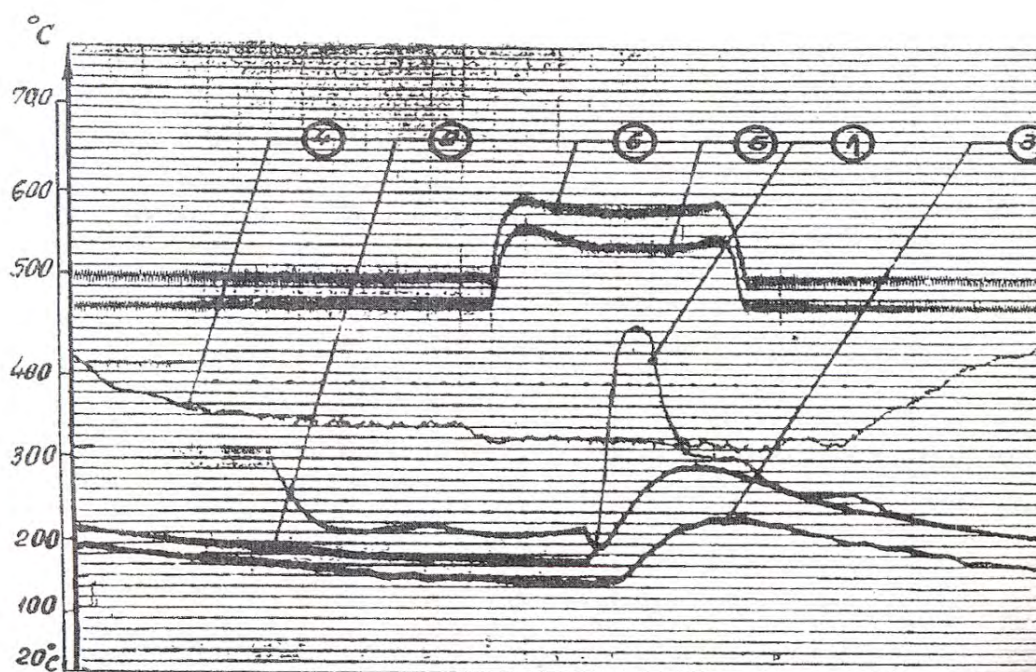


Fig.3.12 Oscilograma variațiilor câmpurilor de temperatură pentru o rotație a cilindrilor, cu perioada 2π radiani, în timpul laminării experimentale, cu numărul de rotații $n_1 = 35,7$ rot/min:

1...3 - curbele variațiilor de temperatură pe suprafața cilindrului și la adâncimile $\Delta r = 1,5; 3,0$ mm; 4 - viteza de laminare; 5,6 - forțele de laminare.

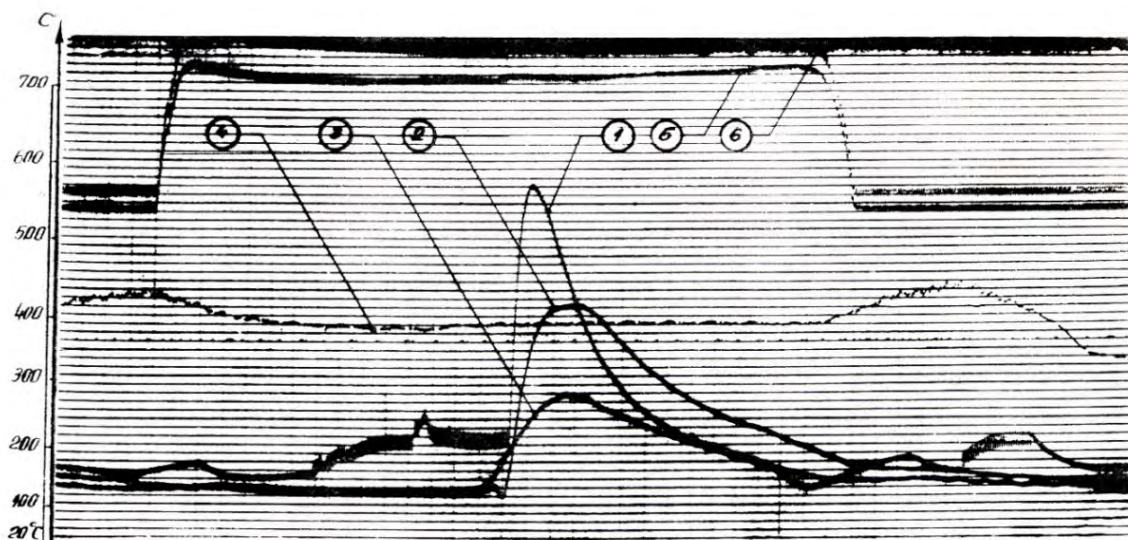


Fig. 3.13. Oscilograma variațiilor câmpurilor de temperatură pentru o rotație a cilindrilor, cu perioada 2π radiani, în timpul laminării experimentale, cu numărul de rotații $n_2 = 93,0$ rot/min:

1...3 - curbele variațiilor de temperatură pe suprafața cilindrului și la adâncimile $\Delta r = 1,5; 3,0$ mm; 4 - viteza de laminare; 5,6 - forțele de laminare.

Din analiza oscilogramelor se remarcă caracterul exponențial al curbelor variațiilor de temperaturi presupus în analiza procesului de laminare la cald prezentat în capitolul 2, [112-114].

Variația câmpurilor de temperaturi arată faptul că temperaturile maxime s-au înregistrat la viteze mici de laminare, exemplu în acest sens fiind oscilograma din fig. 3.12, care corespunde turației de 35,7 rot/min. La trecerile cu viteze unghiulare relativ mici, după ce suprafața calibrului ajunge în zona unghiurilor corespunzătoare jeturilor de răcire cu apă, temperatura acestuia devine mai mică decât temperatura stratului superficial, până la adâncimea de 3 mm. De asemenea, se observă că vârful de temperaturi la diferite nivele sub suprafața calibrului, respectiv la adâncimea $\Delta r = 1,5; 3,0$ mm sunt deplasate pe orizontală, având un decalaj la un anumit unghi de rotație " φ ", fapt ce indică timpul de transmitere al căldurii în masa cilindrului de laminare, [107-114]. Studiul oscilogramelor înregistrate după mai multe treceri, în aceleași condiții și la același număr de rotații ale cilindrilor de laminare, a fost sintetizat, iar media valorilor s-a centralizat sub formă tabelară. Prelucrarea acestor date a permis determinarea câmpurilor simetrice și a celor asimetrice de temperaturi, care acționează atât pe suprafața cilindrilor, cât și în secțiunea radială a acestora, [112-114].

În tabelul 3.3 se prezintă valorile temperaturilor determinate pe circumferința cilindrului experimental, pentru o turație cu $n_1 = 35,7$ rot/min, iar în tabelul 3.4 pentru turația $n_2 = 93$ rot/min. Rezultatele din tabele sunt obținute pe baza determinărilor experimentale și a aparatului matematic prezentat în capitolul 2, [112, 114].

Tabelul 3.3

Valorile variațiilor de temperatură de pe circumferința cilindrului experimental $n_1 = 35,7$ rot/min

Unghiul	div.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
φ	rad.	0,13	0,27	0,409	0,516	0,682	0,819	0,956	1,092	1,229	1,365	1,502	1,639
Curba 1	°C	128	443	524,0	495,0	451,3	402,7	351,6	290,0	253,3	219,9	200,0	182,6
$\Delta r = 0$	θ	0,21	0,83	1,0	0,942	0,855	0,759	0,657	0,535	0,462	0,396	0,357	0,322
Curba 2	°C	86,0	159	263,3	319,3	348,4	361,2	362,9	353,2	338,7	314,5	288,3	327,0
$\Delta r = 1,5$ m	θ	0,13	0,27	0,482	0,593	0,651	0,677	0,680	0,661	0,632	0,584	0,532	0,496
Curba 3	°C	100,0	135	170,1	187,7	205,0	288,3	211,6	203,3	191,2	177,2	146,9	152,6
$\Delta r = 3$ mm	θ	0,158	0,22	0,297	0,332	0,367	0,373	0,380	0,663	0,339	0,311	0,287	0,263
Unghiul	div.	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
φ	rad.	1,775	1,91	2,048	2,185	2,322	2,458	2,505	2,731	2,868	3,004	3,140	3,228
Curba 1	°C	166	156	145,6	135,1	131,5	128,1	128,6	121,1	117,5	114,0	110,5	100,0
$\Delta r = 0$	θ	0,28	0,27	0,249	0,228	0,221	0,214	0,241	0,200	0,193	0,189	0,179	0,158

Continuare tabel 3.3

Curba 2 $\Delta r=1,5\text{m}$ m	°C	255	238	221,6	211,6	201,6	187,7	175,4	168,4	161,4	157,8	154,3	152,6
	θ	0,46	0,43	0,400	0,180	0,360	0,332	0,302	0,294	0,280	0,273	0,266	0,283
Curba 3 $\Delta r=3\text{ mm}$	°C	147	142	138,6	135,9	135,1	129,8	128,1	124,6	121,1	115,8	110,5	100,0
	θ	0,25	0,24	0,135	0,230	0,228	0,217	0,214	0,207	0,200	0,190	0,179	0,158
Unghiul φ	div.	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
	rad.	3,41	3,55	3,687	3,824	3,961	4,097	4,234	4,370	4,507	4,644	4,780	4,917
Curba 1 $\Delta r=0$	°C	80,0	66,0	52,0	60,0	72,0	80,0	88,0	100,0	110,0	117,5	121,1	128,1
	θ	0,11	0,09	0,063	0,079	0,103	0,119	0,134	0,158	0,179	0,193	0,200	0,214
Curba 2 $\Delta r=1,5\text{m}$ m	°C	145	136	128,1	119,2	108,7	100,0	94,0	94,0	96,0	96,0	92,0	86,0
	θ	0,24	0,23	0,214	0,197	0,176	0,158	0,146	0,146	0,150	0,150	0,142	0,130
Curba 3 $\Delta r=3\text{ mm}$	°C	80,0	68,0	65,0	60,0	72,0	80,0	88,0	86,0	82,0	80,0	80,0	80,0
	θ	0,11	0,09	0,089	0,079	0,103	0,119	0,134	0,134	0,123	0,119	0,119	0,119
Unghiul φ	dv	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	Temperatura medie	
	rad.	5,06	5,19	5,326	5,463	5,599	5,736	5,873	6,009	6,148	6,282		
Curba 1 $\Delta r=0$	°C	131	128	135,1	152,6	145,6	135,1	135,1	135,0	135,0	135,0	$\bar{t}_0=169,5^\circ\text{C}$	
	θ	0,21	0,21	0,228	0,263	0,249	0,228	0,228	0,227	0,227	0,227	$\bar{\theta}_0=0,29738$	
Curb 2 $\Delta r=1,5\text{m}$ m	°C	94,0	107	121,0	115,7	103,5	96,0	92,0	92,0	92,0	90,0	$\bar{t}_1=172,4^\circ\text{C}$	
	θ	0,14	0,17	0,200	0,190	0,165	0,150	0,142	0,142	0,142	0,138	$\bar{\theta}_1=0,3032$	
Curba 3 $\Delta r=3\text{ mm}$	°C	84,0	86,0	88,0	90,0	90,0	90,0	88,0	86,0	84,0	84,0	$\bar{t}_2=115,3^\circ\text{C}$	
	θ	0,12	0,13	0,134	0,138	0,138	0,138	0,134	0,130	0,126	0,126	$\bar{\theta}_2=0,18978$	

Tabelul 3.4

Valorile variațiilor de temperatură de pe circumferința cilindrului experimental $n_2 = 93\text{ rot/min}$

Unghiul φ	div.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	rad.	0,196	0,39	0,58	0,785	0,98	1,178	1,137	1,570	1,767	1,963	2,159	2,356
Curba 1 $\Delta r=0$	°C	100,0	167	306,	362,5	375	370,8	346,8	278,1	250,0	231,1	225,0	218,7
	θ	0,158	0,29	0,56	0,679	0,70	0,696	0,648	0,512	0,456	0,420	0,406	0,394
Curba 2 $\Delta r=1,5\text{ mm}$	°C	72,0	86,0	100	118,7	139	160,7	171,4	182,1	189,2	194,6	198,2	200,0
	θ	0,103	0,13	0,15	0,196	0,23	0,279	0,300	0,321	0,335	0,346	0,353	0,359
Curba 3 $\Delta r=3\text{m}$ m	°C	54,0	53,0	53,0	54,0	58,0	68,0	80,0	92,0	103,1	109,3	112,5	118,7
	θ	0,067	0,06	0,06	0,067	0,07	0,095	0,119	0,142	0,164	0,177	0,183	0,195
Unghiul φ	div.	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	rad.	2,552	2,74	2,94	3,141	3,33	3,534	3,730	3,936	4,123	4,319	4,516	4,712
Curba 1 $\Delta r=0$	°C	212,5	210,	212	209,3	203	192,8	182,8	175,9	167,8	164,2	160,7	157,1
	θ	0,381	0,37	0,38	0,375	0,33	0,342	0,323	0,307	0,293	0,286	0,229	0,272
Curba 2 $\Delta r=1,5\text{ mm}$	°C	197,3	194,	192	189,2	187	182,1	178,5	173,2	167,8	164,2	152,1	151,7
	θ	0,351	0,34	0,34	0,335	0,33	0,321	0,314	0,303	0,293	0,286	0,252	0,261
Curba 3 $\Delta r=3\text{m}$ m	°C	123,4	123	121	123,4	123	120,3	115,6	114,0	110,9	107,8	106,2	104,6
	θ	0,205	0,2	0,20	0,205	0,20	0,199	0,189	0,186	0,179	0,124	0,171	0,168
Unghiul φ	div.	24	25	26	27	28	29	30	31	Temperatura medie			
	rad.	4,905	5,10	5,30	5,497	5,69	5,890	6,086	6,283				
Curba 1 $\Delta r=0$	°C	157,4	157,	160	158,9	153	146,4	139,2	128,5	$\bar{t}_0=203,58911^\circ\text{C}$			
	θ	0,272	0,27	0,27	0,275	0,26	0,250	0,236	0,215	$\bar{\theta}_0=0,3653645$			
Curba 2 $\Delta r=1,5\text{ mm}$	°C	146,4	142	139	135,7	133	132,1	129,4	126,7	$\bar{t}_1=153,01211^\circ\text{C}$			
	θ	0,250	0,24	0,23	0,229	0,22	0,227	0,217	0,211	$\bar{\theta}_1=0,264999$			
Curba 3 $\Delta r=3\text{m}$ m	°C	103,0	100	94,0	92,0	92,0	88,0	84,0	84,0	$\bar{t}_2=93,501145^\circ\text{C}$			
	θ	0,164	0,15	0,14	0,142	0,14	0,134	0,126	0,126	$\bar{\theta}_2=0,146989$			

În tabelele anterioare se prezintă și valorile temperaturilor medii " $\bar{t}$ ", pentru fiecare diagramă de variație a temperaturilor, precum și sub formă adimensională, respectiv temperaturi specifice „ θ ”. Valorile temperaturii specifice „ θ ” sunt necesare atât pentru determinarea temperaturilor optime de încălzire inițială a cilindrilor din cajele degrositoare, cât și pentru calculul tensiunilor termice produse de variațiile de temperaturi, [109-115, 127]. În tabelul 3.5 se prezintă sinteza datelor obținute pentru câmpurile de temperaturi înregistrate la laminarea experimentală.

Tabel 3.5

**Sinteza datelor caracteristice pentru câmpurile de temperaturi înregistrate
la laminarea experimentală**

n ₁ =35,7 rot/min				
Unghiul de introducere a căldurii φ _i = 1,6388 rad		Unghiul de evacuare a căldurii φ _e = 4,4429 rad		
Raza specifică	Temperatura determinată			
	Maximă		Medie	
	t _{max} [°C]	θ	t̄ [°C]	θ̄
ρ ₀ ; Δr = 0,2 mm	524,8	1,0	169,5	0,29738
ρ ₁ ; Δr = 1,5 mm	362,9	0,680	172,4	0,30320
ρ ₂ ; Δr = 3 mm	288,3	0,380	115,33	0,11898
n ₂ =93 rot/min				
Unghiul de introducere a căldurii φ _i = 2,9452 rad		Unghiul de evacuare a căldurii φ _e = 3,33794 rad		
Raza specifică	Temperatura determinată			
	Maximă		Medie	
	t _{max} [°C]	θ	t̄ [°C]	θ̄
ρ ₀ ; Δr = 0 mm	375,0	0,704	203,58	0,36536
ρ ₁ ; Δr = 1,5 mm	200,0	0,357	153,01	0,26499
ρ ₂ ; Δr = 3 mm	123,4	0,205	93,5	0,14698

3.4 Determinări experimentale ale variațiilor de temperaturi folosind module analogice și tehnica electronică de calcul

În acest subcapitol se prezintă determinările experimentale ale variațiilor de temperaturi efectuate pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor de laminare pentru viteze unghiulare constante, corespunzător stărilor izocrone, având turația $n = 32,5 \text{ rot/min}$ și $226,4 \text{ rot/min}$. În același timp au fost studiate și valori intermediare din intervalul turațiilor anterior subliniate, stabilindu-se că cei mai mulți cilindrii au numărul de rotații apropiat de $n_2 = 65,2 \text{ rot/min}$, $n_3 = 973 \text{ rot/min}$, $n_4 = 150,7 \text{ rot/min}$, [104,114-121].

Pentru achiziția datelor privind variațiile de temperaturi date de termocuplele, precum și a forțelor de laminare și a numărului de rotații a cilindrilor sub formă de fișiere cu măsurători în puncte, a fost necesar să întocmim un program de calcul prezentat în lucrările [104,111-120].

Pentru cele cinci stări izocrone experimentale au fost înregistrate cinci fișiere, pentru fiecare dintre ele stabilindu-se numărul de diviziuni, respectiv de puncte de măsură, în intervalul unghiului de rotație $\varphi = 2\pi$ radiani. În aceste intervale de timp s-au înregistrat:

- temperatura pe suprafața cilindrului de laminare, $\Delta r = 0,2 \text{ mm}$;
- temperatura în secțiunea cilindrului de laminare la adâncimea $\Delta r = 1,5 \text{ mm}$;
- temperatura în secțiunea cilindrului de laminare la adâncimea $\Delta r = 3,0 \text{ mm}$;
- temperatura în suprafața cilindrului de laminare la adâncimea $\Delta r = 6,0 \text{ mm}$;
- $n [\text{rot/min}]$ - turația cilindrilor de laminare;
- $F [\text{kN}]$ - forța de laminare din timpul unei rotații.

Pentru fiecare din cele cinci stări izocrone de temperaturi, corespunzător fiecărui fișier cu măsurători în puncte, la un unghi de rotație $\varphi = 2\pi$ radiani, s-a obținut câte o diagramă de temperaturi. Diagramele variațiilor de temperaturi din cilindrii experimentali de laminare pentru cele cinci stări izocrone analizate se prezintă în fig.3.14- 3.18.

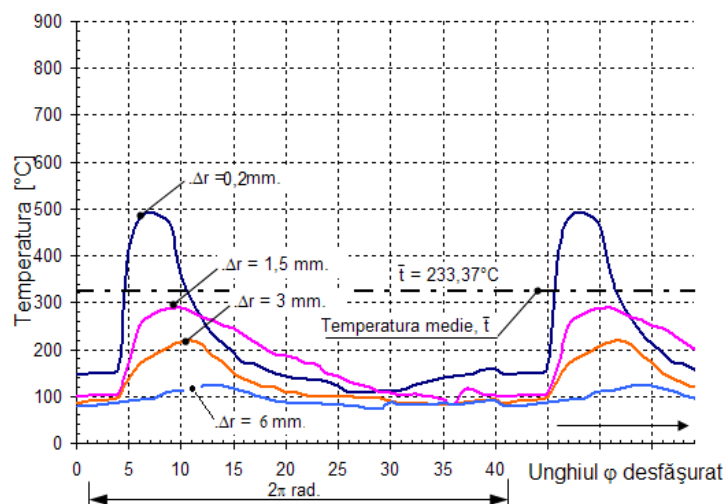


Fig.3.14 Diagrama variațiilor de temperatură la laminarea experimentală cu $n = 32,5$ rot/min

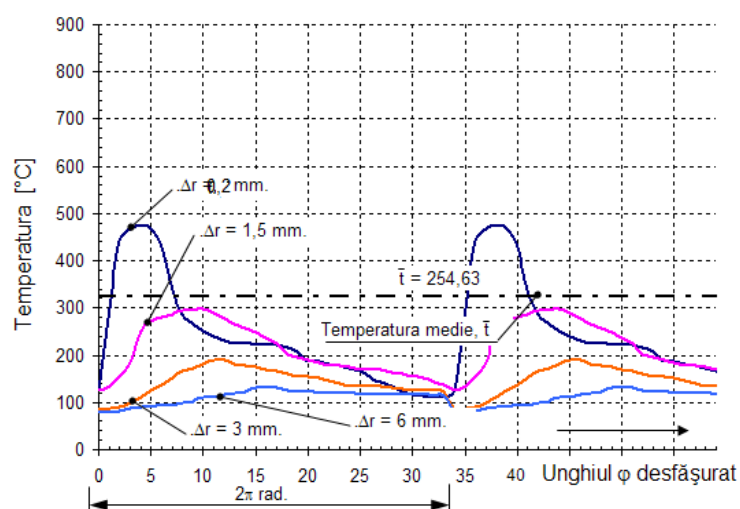


Fig.3.15 Diagrama variațiilor de temperatură la laminarea experimentală cu $n = 65,2$ rot/min

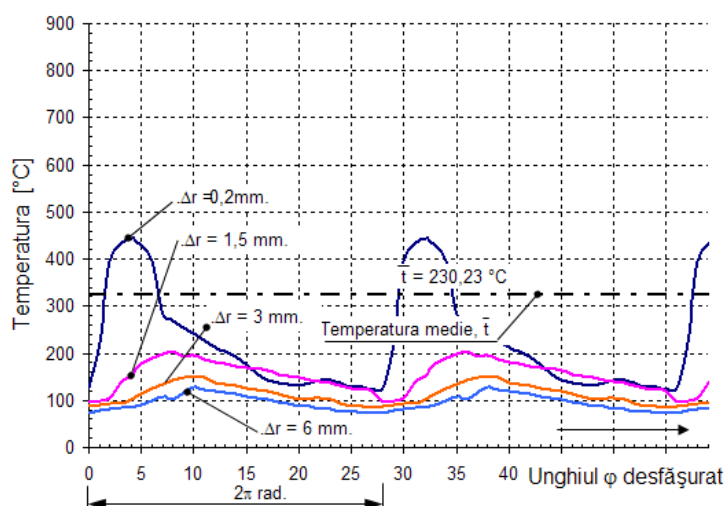


Fig.3.16 Diagrama variațiilor de temperatură la laminarea experimentală cu $n = 95,3$ rot/min

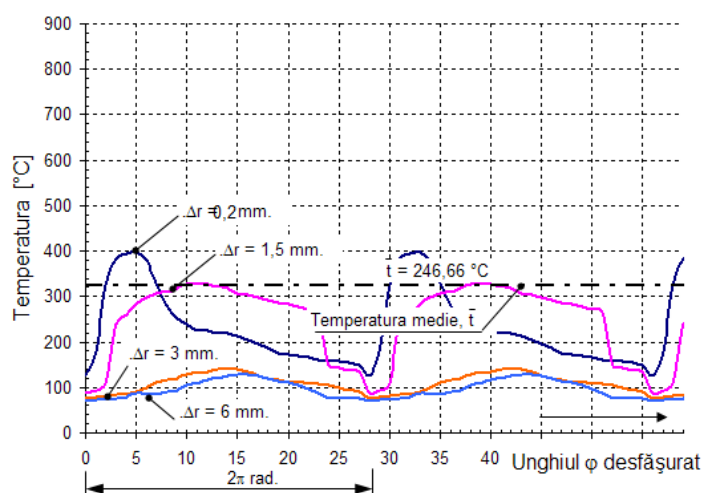


Fig.3.17 Diagrama variațiilor de temperatură la laminarea experimentală cu $n=150,7$ rot/min

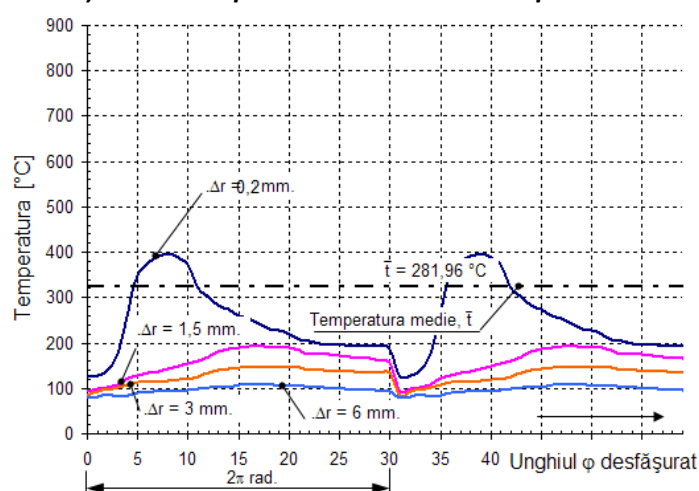


Fig.3.18 Diagrama variațiilor de temperatură la laminarea experimentală cu $n=226,4$ rot/min

Datele caracteristice, reprezentând valorile maxime, minime și medii pentru fiecare din curbele de variație de temperaturi se prezintă în tabelul 3.6, [112,118].

Din analiza diagramelor rezultă că variațiile maxime de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor se produc la viteze mici de laminare. În diagrama din fig 3.14 în care laminarea s-a efectuat cu turația $n=32,5$ rot/min, temperatura maximă pe suprafața cilindrului este de $493,3^{\circ}\text{C}$, aceasta fiind și cea mai mare temperatură obținută dintre toate celelalte diagrame, înregistrate la viteze mai mari de laminare.

Tabelul 3.6

Sinteza datelor rezultate din calculele diagramelor variațiilor de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrilor de laminare, înregistrate la laminarea experimentală pentru cele cinci diagrame izocrone de temperaturi

Diagrama izocronă a variațiilor de temperaturi fig.3.14, n = 32,5rot/min			
Unghiul de introducere a căldurii în cilindru, ϕ_i		Unghiul de evacuare a căldurii în cilindru, ϕ_e	
$\phi_i = 81^{\circ}\text{C} = 1,413\text{rad}$		$\phi_e = 279^{\circ}\text{C} = 4,867\text{rad}$	
Temperatura determinată			
Maximă t_{max} [°C]	Adâncimea Δr [mm]	Medie $\bar{t}$ [°C]	Minimă t_{min} [°C]
493,3	$\Delta r = 0\text{mm}$	233,37526	108,3
289,9	$\Delta r = 1,5\text{mm}$	187,80601	80,7
220,1	$\Delta r = 3,0\text{mm}$	137,85123	83,1
125,8	$\Delta r = 6.0\text{mm}$	104.84721	71.7

Continuare tabel 3.6

Diagrama izocronă a variațiilor de temperatură fig.3.15, n = 65,2 rot/min			
Unghiul de introducere a căldurii în cilindru, ϕ_i		Unghiul de evacuare a căldurii în cilindru, ϕ_e	
$\phi_i=102^{\circ}54' \text{ }^{\circ}\text{C}=1,786\text{rad}$		$\phi_e=257^{\circ}46' \text{ }^{\circ}\text{C}=4.494\text{rad}$	
Temperatura determinată			
Maximă $t_{\max} [^{\circ}\text{C}]$	Adâncimea $\Delta r [\text{mm}]$	Medie $\bar{t} [^{\circ}\text{C}]$	Minimă $t_{\min} [^{\circ}\text{C}]$
457,9	$\Delta r = 0,2 \text{ mm}$	254,63496	110,4
297,9	$\Delta r = 1,5 \text{ mm}$	184,52471	125,1
191,2	$\Delta r = 3,0 \text{ mm}$	152,67694	85,3
134,1	$\Delta r = 6,0 \text{ mm}$	117,71828	80,1
Diagrama izocronă a variațiilor de temperatură fig.3.16, n = 95,3 rot/min			
Unghiul de introducere a căldurii în cilindru, ϕ_i		Unghiul de evacuare a căldurii în cilindru, ϕ_e	
$\phi_i =133^{\circ}33' \text{ }^{\circ}\text{C} = 2,325\text{rad}$		$\phi_e=226^{\circ}67' \text{ }^{\circ}\text{C} = 3,955\text{rad}$	
Temperatura determinată			
Maximă $t_{\max} [^{\circ}\text{C}]$	Adâncimea $\Delta r [\text{mm}]$	Medie $\bar{t} [^{\circ}\text{C}]$	Minimă $t_{\min} [^{\circ}\text{C}]$
444,0	$\Delta r = 0,2 \text{ mm}$	230,23953	123,9
204,4	$\Delta r = 1,5 \text{ mm}$	168,79632	96,1
150,3	$\Delta r = 3,0 \text{ mm}$	124,1695	84,4
128,0	$\Delta r = 6,0 \text{ mm}$	104,49997	71,8
Diagrama izocronă a variațiilor de temperatură fig.3.17,n =150,7rot/min			
Unghiul de introducere a căldurii în cilindru, ϕ_i		Unghiul de evacuare a căldurii în cilindru, ϕ_e	
$\phi_i=106^{\circ}60' \text{ }^{\circ}\text{C} = 1,86\text{rad}$		$\phi_e = 253^{\circ}34' \text{ }^{\circ}\text{C} = 4,42\text{rad}$	
Temperatura determinată			
Maximă $t_{\max} [^{\circ}\text{C}]$	Adâncimea $\Delta r [\text{mm}]$	Medie $\bar{t} [^{\circ}\text{C}]$	Minimă $t_{\min} [^{\circ}\text{C}]$
398,2	$\Delta r = 0,2 \text{ mm}$	246,664	125,2
216,4	$\Delta r = 1,5 \text{ mm}$	179,63125	88,5
140,6	$\Delta r = 3,0 \text{ mm}$	118,30046	75,6
129,5	$\Delta r = 6,0 \text{ mm}$	105,2055	69,4
Diagrama izocronă a variațiilor de temperatură fig.3.18 n = 226,4 rot/min			
Unghiul de introducere a căldurii în cilindru, ϕ_i		Unghiul de evacuare a căldurii în cilindru, ϕ_e	
$\phi_i=106^{\circ}8' \text{ }^{\circ}\text{C} = 1,862\text{rad}$		$\phi_e=253^{\circ}2' \text{ }^{\circ}\text{C} = 4,418\text{rad}$	
Temperatura determinată			
Maximă $t_{\max} [^{\circ}\text{C}]$	Adâncimea $\Delta r [\text{mm}]$	Medie $\bar{t} [^{\circ}\text{C}]$	Minimă $t_{\min} [^{\circ}\text{C}]$
396,9	$\Delta r = 0,2 \text{ mm}$	281,96502	124,9
191,7	$\Delta r = 1,5 \text{ mm}$	184,31451	92,8
147,1	$\Delta r = 3,0 \text{ mm}$	121,0654	85,5
107,5	$\Delta r = 6,0 \text{ mm}$	113,96455	80,3

Vârfurile curbilor variațiilor de temperaturi au o anumită deplasare orizontală, acesta reprezentând timpul de transfer de căldură în adâncimea secțiunii cilindrului.

Pentru aflarea valorilor temperaturii medii „ $\bar{t}$ ”, a fost necesar să integrăm variațiile de temperaturi obținute după curbele exponențiale experimentale, utilizând relația lui Simpson (2.1), prezentată în capitolul 2. În diagramele de temperaturi intervalul corespunzător unei rotații complete a cilindrului de laminare, corespunzătoare unghiului „ ϕ desfășurat”, în intervalul $0-2\pi$ radiani, a fost împărțit într-un anumit număr de diviziuni, cărora le corespunde o anumită valoare a temperaturii pe ordonată. Valorile temperaturii corespunzătoare diviziunilor unghiului „ ϕ ” de pe ordonată sunt necesare pentru calculul tensiunilor termice, precum și pentru evidențierea câmpurilor de temperaturi simetrice și asimetrice. În tabelul 3.6, pentru fiecare diagramă de temperaturi este precizat unghiul ϕ_i – care indică zona unghiulară din cilindrul de laminare în care se introduce căldură în cilindrii de laminare, respectiv ϕ_e zona în care se evacuează căldura din cilindri de laminare, [114].

3.5 Modelare matematică a curbelor variațiilor de temperaturi

Pentru demonstrarea caracterului exponențial al curbelor de variație a temperaturilor din cilindrii de laminare la cald, s-a realizat un model matematic corespunzător turației $n = 35,7$ rot/min. Pentru descrierea curbei sau scris următoarele funcții matematice, [29]:

$$F_{a-c} = C\varphi^2 + B\varphi + A$$

$$F_{c-b} = C_1\varphi^2 + B_1\varphi + A_1$$

Valorile coeficienților A, B, C respectiv A_1 , B_1 , C_1 sunt calculate prin următoarele relații, [29]:

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \varphi_i \right)^2, \quad S_2 = \sum_{i=1}^n \varphi_i^3 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i \sum_{i=1}^n \varphi_i^2, \quad S_3 = \sum_{i=1}^n \varphi_i^4 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \varphi_i^2 \right)^2$$

$$S_4 = \sum_{i=1}^n \varphi_i \sum_{i=1}^n t_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i \sum_{i=1}^n t_i, \quad S_5 = \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 \sum_{i=1}^n t_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 \sum_{i=1}^n t_i$$

$$C = \frac{S_2 S_4 - S_1 S_5}{S_2 S_2 - S_1 S_3}, \quad B = \frac{S_4}{S_2} - C \frac{S_2}{S_1}, \quad A = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n t_i - B \sum_{i=1}^n \varphi_i - C \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 \right]$$

Unde: φ - valoarea unghiului de pe abscisă;

t - valoarea temperaturi corespunzătoare unghiului de introducere a căldurii în cilindru;

n - numărul de diviziuni în care s-a împărțit intervalul "0-2 π rad".

Calculul acestor coeficienți s-a făcut folosind mediul de programare Matlab și datele experimentale înregistrat pentru curba $t(1, \varphi)$. Pentru porțiunea ascendentă a curbei s-a obținut ecuația, [29]:

$$F(X) = -4062,6 X^2 + 1907,6 X + 37,8046$$

iar pentru porțiunea descendentă a curbei s-a obținut ecuația, [29]

$$F(X) = 193,4871 X^2 - 737,1040 X + 813,006$$

Reprezentarea curbei de variație a temperaturilor pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrului se prezintă în fig.3.19. Modelarea a fost efectuată pentru o singură diagramă de variație a temperaturii, corespunzătoare unui număr de rotații de 35,7 rot/min, toate celelalte diagrame pentru alte condiții de temperatură izocronă respectând același principiu matematic, [29].

În fig.3.20 se prezintă diagramele comparative, obținute ca rezultat al modelării matematice și a determinărilor experimentale a câmpului de temperaturi pe suprafața cilindrului, precum și în secțiunea radială a acestuia, la adâncimile ($\Delta r = 1,5, 3,0, 6,0$ mm). Se observă faptul că diagramele păstrează alura prezentată în literatura de specialitate, fără a schimba punctele de inflexiune, deci abordarea matematică a modelării variațiilor de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrului de laminor este corect abordată, [29].

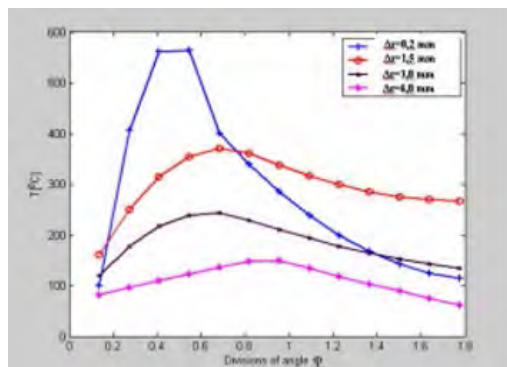


Fig.3.19 Diagrama de variație a temperaturii pe suprafața și în secțiunea radială a cilindrului de laminare la cald pentru $n=35,7$ rot/min

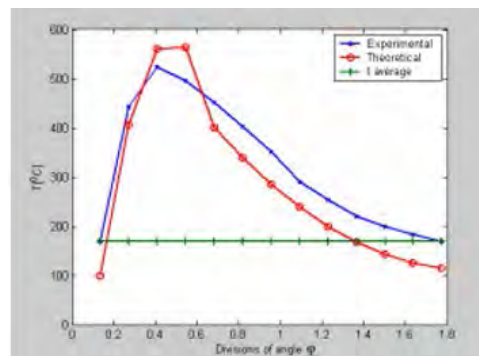


Fig.3.20 Diagrama comparativă teoretică și experimentală corespunzătoare variației de temperaturi de la suprafața și din secțiunea radială a cilindrului pentru $n=35,7$ rot/min

În diagramele prezentate în fig.3.19 se observă aceeași deplasare orizontală a vârfurilor de temperaturi ca și în cazul determinărilor experimentale. Aceasta reprezintă transferul de căldură în timpul laminării în secțiunea radială a cilindrului de laminare, ceea ce arată că modelul matematic elaborat confirmă atât literatura de specialitate, cât și determinările experimentale.

3.6 Concluzii

Concluziile la finalul acestui capitol se referă la:

- analiza procesului tehnologic de laminare la cald a condus la cunoșterea modului de repartizare a temperaturii pe suprafața cilindrilor de laminare, reprezentând punerea în evidență a variației ciclice a câmpurilor de temperaturi din funcționarea cilindrilor de laminare;
- cercetările experimentale efectuate atât cu metoda clasică prin oscilografieri, cât și prin utilizarea tehnicii electronice de calcul utilizând module analogice de tip ADAM pentru achiziționarea datelor, au confirmat variația câmpurilor de temperaturi după o curbă exponențială, presupusă în analiza teoretică a procesului tehnologic de laminare, prezentată în capitolul 2;
- variațiile de temperaturi din diagramele înregistrate reprezintă stări izocrone pentru o rotație a cilindrului de laminare după unghiul $\phi = 2\pi$ radiani;
- variațiile de temperaturi sunt influențate de vitezele de laminare, respectiv de numărul de rotații a cilindrilor;
- variațiile maxime de temperaturi se produc la viteze mici de laminare.
- determinarea temperaturii medii $\bar{t}$ cu ajutorul relației de aproximare a lui Simpson reprezintă integrala funcției variației de temperatură descrisă de curba exponențială determinată experimental;
- analiza regimului termic al cilindrilor de laminare la cald în cele două variante de abordare, au permis separarea câmpurilor de temperaturi în simetrice și asimetrice, linia de separație dintre cele două fiind temperatura medie $\bar{t}$.

CAPITOLUL 4

DETERMINAREA TENSIUNILOR DIN CILINDRI DE LAMINARE LA CALD

4.1 Elemente ale calculului de rezistență al cilindrilor de laminare la cald

Cilindrii de laminare la cald sunt organe de mașini de dimensiuni relativ mari, masa lor ajungând să fie cuprinsă între $300 \div 30\,000$ kg. Cercetările din domeniu arată că aproximativ $1/8 \dots 1/10$ din cilindrii de laminare sunt scoși din exploatare din cauza ruperilor sub acțiunea preponderentă a tensiunilor termice, care produc avarii și opriri accidentale a utilajelor de laminare. În acest sens, pagubele produse nu se rezumă numai la costul cilindrilor ci ele se extind și asupra pierderilor de producție, dereglând întregul flux tehnologic. Având în vedere aceste aspecte s-a pus problema cunoașterii caracterului tensiunilor de solicitare, precum și evaluarea cât mai exactă a acestora în exploatare, în scopul determinării duratei de viață a cilindrilor de laminare la cald, [7,10,15,26,28,35,101,107-114].

Calculul tensiunilor care apar în cilindri de laminare ca rezultat al procesului de deformare plastică din timpul laminării, constituie un element de bază pentru dimensionarea acestora. Metodele clasice de dimensionare a cilindrilor nu răspund la multe din fenomenele care se produc între cilindri și laminat, [6,21,22,30,31,33]. În literatura de specialitate, cilindrii de laminare se calculează la solicitări statice, care se consideră constante în timp și nu se ține seama de influența preponderentă a tensiunilor termice, care reprezintă una dintre cauzele fundamentale care duc la distrugerea acestora. Nu rare sunt cazurile în care ruperea cilindrilor de laminare se face prin forfecarea cordoanelor calibrelor în secțiunile maxime ale acestora ca urmare a șocurilor termice. Cunoașterea efectelor negative de distrugere a cilindrilor de laminare, în scopul atenuării și eliminării cauzelor de distrugere prin fisurare și rupere a acestora, impune cercetarea teoretică și experimentală asupra tensiunilor mecanice și termice în vederea exploatării raționale a laminoarelor, [10,17,22,25,26,33,101,107-109,112-114]. Observațiile anterior precizate sunt remarcate și în lucrările de specialitate din acest domeniu, [6,21,22,30,31,33,52].

Studiul tensiunilor care solicită cilindri de laminare la cald au fost realizate în mai multe etape, în primul rând prin observarea consecințelor efectelor solicitărilor mecanice asupra cilindrilor de laminare, respectiv efectele solicitărilor termice ciclice generate de câmpurile de temperaturi din procesul de laminare la cald. În acest sens a fost necesară cunoașterea regimului termic al cilindrilor de laminare la cald care a fost cercetat pe un laminor experimental, sinteza acestor cercetări fiind prezentată în capitolul 3.

Cercetările cu privire la determinarea tensiunilor din cilindrii de laminare la cald au fost realizate în cadrul grantului de cercetare obținut prin competiție la nivel național AT, Nr. GR/19.05.2006 cod CNCIS 45, Tema 3, directorul grantului fiind autoarea acestei teze de abilitare [113].

4.2 Calculul tensiunilor mecanice

Calculul clasic de rezistență al cilindrilor de laminare se rezumă la următoarele, [8,21,22,113,114,122]:

- tăblia cilindrului se calculează la încovoiere statică;
- fusurile cilindrului se calculează la încovoiere și răsucire;
- fusurile de palet se calculează la tensiuni de răsucire, iar paletul se calculează la încovoiere și răsucire.

Tăblia calibrelor cilindrilor de laminare lucrează în condiții de solicitări compuse cum sunt: încovoiere rotativă produsă de forțele de laminare, răsucire produsă de momentele de deformare, precum și solicitări termice, produse de variațiile de temperaturi din cilindri de laminare.

În fig.4.1 se prezintă tensiunile de încovoiere care sunt variabile în secțiunea cilindrului și se determină cu relația, [52,112-114,125,126,133,134]:

$$\sigma_i = \frac{M_i}{\frac{I_z}{y}} \alpha_k = \frac{M_i r}{\frac{\pi R^4}{4}} \quad (4.1)$$

În care: M_i – momentul încovoietor care acționează asupra cilindrului în timpul laminării, considerându-se că forța de laminare este uniform repartizată pe lățimea « b »;

$$M_i = P \cdot \left[\frac{x_1 x_2}{L} - \frac{b}{8} \right] \quad (4.2)$$

În care: F – forța de laminare obținută experimental, $P = 2F$;

x_1, x_2 – distanța de la lagăr până la axa laminatului; $x_1 = x_2 = 420\text{mm}$;

L – distanța dintre axele lagărelor; $L = 840\text{mm}$;

R – raza cilindrului pe calibrul pe care se efectuează laminarea; $R = 98\text{mm}$;

b – lățimea laminatului corespunzător cu trecerea din calibr; $b = 46\text{mm}$;

α_k – factorul de formă pentru concentrarea tensiunilor pe cilindri de laminare calibrați;

r – raza de la axa neutră a cilindrului până în secțiunea elementară din cilindru, determinată de adâncimea Δr , $r = R - \Delta r$; Δr are valorile: $\Delta r = 0; 1,5; 3,0; 6,0; 98\text{ mm}$.

Tăblia cilindrilor de laminare este supusă și la tensiuni de răsucire produse de momentul de laminare. Aceste tensiuni se determină cu relația (4.3), [52,112-114,125,126,133,134].

$$\tau = \frac{\alpha_k M_t}{\frac{I_p}{r}} = \frac{M_t}{\frac{R^4}{2r}} \alpha_k \quad (4.3)$$

În care: M_t – momentul de răsucire egal cu momentul de laminare, [52]:

$$M_t = 0,5F\sqrt{R\Delta h};$$

Δh – reducerea din secțiune corespunzător cu schema de laminare;

r – raza dusă din centrul cilindrului până la suprafața elementară.

Tensiunile de încovoiere și răsucire acționează simultan în secțiunea cilindrilor de laminare. Calculul acestor tensiuni s-a efectuat pentru fibrele din secțiunea cilindrului corespunzătoare unei raze oarecare « r », la nivelul căreia vom determina și tensiunile termice obținând, în acest fel, posibilitatea comparării valorilor acestor tensiuni și evaluării influenței lor în superpoziție cu celelalte tipuri de tensiuni calculate, [52,101,108,110,113,114,119-122, 125,131-134].

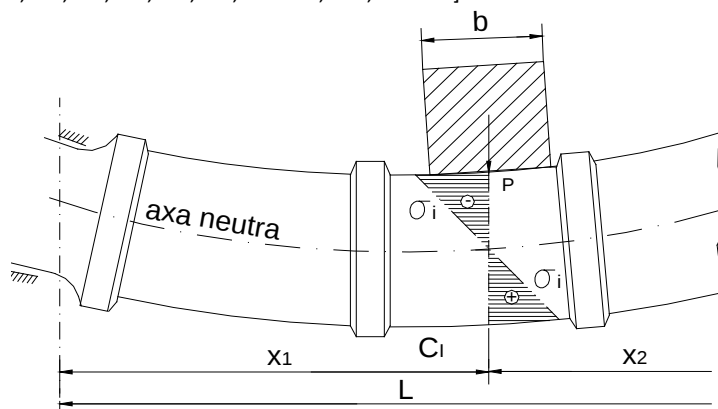


Fig.4.1 Reprezentarea solicitărilor cilindrului de laminare la tensiuni de încovoiere rotativă

Tensiunile de răsucire produse de momentele de laminare au valori deosebit de mici, cea mai mare valoare fiind de $2,29\text{ daN/mm}^2$ la suprafața calibrului. Calculul detaliat al acestor tensiuni pentru toate trecerile din schema de laminare se prezintă detaliat în lucrările, [112-114].

În zona focarului de deformare tensiunile de presiune de contact dintre laminat și cilindri pot fi determinate atât după relații matematice, cât și după valorile medii ale parametrilor obținuți în procesul de laminare. În condițiile deformării plastice din focar se consideră că tensiunile la presiune de contact pe suprafața calibrului cilindrului sunt echivalente cu tensiunile de deformare. În situația concretă pentru laminarea la cald, tensiunile la presiunea de contact nu pot fi determinate cu relația lui Hertz,

care este corespunzătoare numai pentru solicitările din domeniul elastic. Dacă utilizăm pentru presiunea de contact formula lui Ekelud, tensiunea la presiunea de contact se determină cu relația (4.4), utilizând rezultatele experimentale obținute pentru anumiți parametri de laminare, [17,28,31,33,52,108,113,114, 120,122,125,134].

$$\sigma_{pc} = \frac{F_{\max}}{B_m \sqrt{R\Delta h}} \quad (4.4)$$

În care: $F_{\max}$ – forța maximă de laminare;

B_m – lățimea medie a laminatului în focarul de deformare;

$\sqrt{R\Delta h}$ - lungimea arcului de contact;

R – raza calibrului de laminare;

Δh – reducerea înălțimii laminatului pe treceri din schema de laminare.

Rezultatele calculelor tensiunilor mecanice se prezintă în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1

Tensiunile mecanice de încovoiere, produse de forțele de laminare și a celor de presiune de contact dintre suprafața cilindrului și laminat

Adâncimea Δr și raza r în secțiunea radială [mm]	Forța max. de lam inare $P = 2R_A = 2F$ [daN]	Tensiunea de răsucire [daN·mm]	Tensiunea de încovoiere [daN/mm ²]	Tens la presiune de contact [daN/mm ²]
Diagrama izocronă din figura 3.14, $n = 32,5\text{rot/min}$				
$\Delta r = 0; r = R = 98$	1720	351310	1,236	1,46
$\Delta r = 1,5; r = R = 96,5$			1,217	-
$\Delta r = 3,0; r = 95$			1,198	-
$\Delta r = 6,0; r = 92$			1,160	-
$\Delta r = 98; r = 0$			0	-
Diagrama izocronă din figura 3.15, $n = 65,2\text{rot/min}$				
$\Delta r = 0; r = R = 98$	2180	445265	1,566	1,85
$\Delta r = 1,5; r = R = 6,5$			1,542	-
$\Delta r = 3,0; r = 95$			1,518	-
$\Delta r = 6,0; r = 92$			1,470	-
$\Delta r = 98; r = 0$			0	-
Diagrama izocronă din figura 3.16, $n = 95,3\text{rot/min}$				
$\Delta r = 0 \text{ } r = R = 98$	2160	441180	1,552	1,83
$\Delta r = 1,5 \text{ } r = R = 96,5$			1,528	-
$\Delta r = 3,0; r = 95$			1,505	-
$\Delta r = 6,0; r = 92$			1,420	-
$\Delta r = 98 \text{ } r = 0$			0	-
Diagrama izocronă din figura 3.17, $n = 150,7\text{rot/min}$				
$\Delta r = 0; r = R = 98$	2520	514710	1,811	2,142
$\Delta r = 1,5; r = R = 96,5$			1,783	-
$\Delta r = 3,0; r = 95$			1,755	-
$\Delta r = 6,0; r = 92$			1,700	-
$\Delta r = 98; r = 0$			0	-
Diagrama izocronă din figura 3.18, $n = 226,4\text{rot/min}$				
$\Delta r = 0; r = R = 98$	2040	416670	1,466	1,73
$\Delta r = 1,5; r = R = 96,5$			1,443	-
$\Delta r = 3,0; r = 95$			1,421	-
$\Delta r = 6,0; r = 92$			1,376	-
$\Delta r = 98; r = 0$			0	-

Analizând tabelul 4.1 rezultă că tensiunile de încovoiere sunt maxime în stratul superficial, până la o anumită adâncime sub suprafața calibrului, dar cu valori ne semnificative, ele fiind la suprafață de maxim $\sigma_i = 1,811 \text{ daN/mm}^2$, iar spre interiorul cilindrului se atenuează, fiind nule în axa acestuia. Tensiunile aferente solicitării de presiune de contact au efect doar pe suprafața calibrelor în zona focarului de deformare unde s-a obținut valoarea maximă $\sigma_{pc} = 2,142 \text{ daN/mm}^2$, [113,114,120,122,134].

Tensiunile mecanice care solicită cilindri de laminare în exploatare, practic au valori ne semnificative, [112-114,122]. Tensiunile care de fapt duc la distrugerea calibrelor cilindrilor de laminare și produc fisurarea specifică prin oboseală termică sunt tensiunile termice produse de câmpurile de temperaturi care apar în procesul funcționării utilajului de laminare, [113,114,127].

Studiul și cercetarea tensiunilor termice care acționează în cilindri de laminare este impetuos necesară nu numai pentru atenuarea fisurilor produse de oboseala termică, ci și pentru evitarea șocurilor termice, deosebit de periculoase în procesul de exploatare. Acestea sunt produse de variațiile mari, instantanee de temperatură care duc la forfecarea cordoanelor calibrelor cilindrilor în secțiunea maximă a acestora, [113,114,122,127].

4.3 Calculul tensiunilor termice

Cilindrii de laminare suportă solicitări variabile complexe, datorită tensiunilor termice produse de câmpurile de temperaturi specifice procesului de laminare la cald. Separarea câmpurilor de temperaturi, în câmpuri radial simetrice și asimetrice, permite studierea separată nu numai a câmpurilor de temperaturi, ci și a tensiunilor termice produse de acestea, [17,28,106-114,131].

Cercetările asupra tensiunilor termice din cilindri de laminare la cald sunt realizate în coordonate tridimensionale, conform reprezentărilor din fig.4.2.

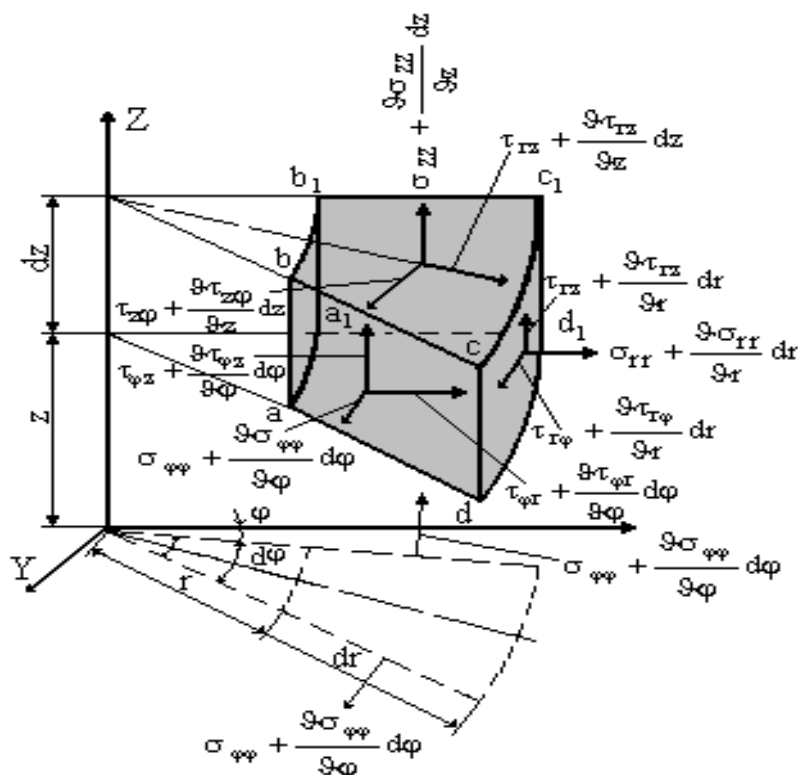


Fig.4.2 Reprezentarea vectorială a tensiunilor normale și tangențiale, ce acționează într-un element material al cilindrului de laminare

Astfel, se analizează acțiunea acestor tensiuni asupra unui element material dintr-un cilindru de laminare. În această figură axele de coordonate X-Y sunt plasate în secțiunea radială a cilindrului de laminare. Pe cele șase suprafețe ale elementului de volum detașat din cilindrul de laminare acționează tensiuni normale, respectiv perpendiculare în planul suprafețelor elementului considerat, pentru care se deosebesc următoarele componente ale tensiunilor, [17,28,32,113,114,119,122,125, 126,131,134]:

- σ_{rr} - tensiune normală radială, care acționează în direcția radială, perpendicular pe patrulaterul abb_1a_1 și cc_1dd_1 ;
- σ_{zz} - tensiune normală axială care acționează în direcția axei OZ, perpendicular pe patrulaterul bb_1cc_1 și aa_1dd_1 ;
- $\sigma_{\varphi\varphi}$ - tensiune normală circumferențială, care acționează perpendicular pe patrulaterul $abcd$ și $a_1b_1c_1d_1$;
- τ_{zr} - tensiune tangențială, care acționează radial în planul patrulaterului bb_1cc_1 și aa_1dd_1 ;
- τ_{rz} - tensiune tangențială, care acționează în direcția paralelă cu axa OZ, în planul aba_1b_1 și dcd_1c_1 ;
- τ_{φ} - tensiune tangențială, în direcție radială ce acționează în planul patrulater $abcd$ și $a_1b_1c_1d_1$;
- $\tau_{r\varphi}$ - tensiune tangențială, ce acționează în direcție tangențială în planul patrulater aba_1b_1 și dcc_1d_1 ;
- $\tau_{\varphi z}$ - tensiune tangențială, ce acționează în direcția axei OY, în planul patrulater $abcd$ și $a_1b_1c_1d_1$;
- $\tau_{z\varphi}$ - tensiunea tangențială care acționează în planul patrulater aa_1d_1d și bb_1c_1c .

În calculele efectuate pentru evidențierea tensiunilor produse de câmpurile radial simetrice de temperaturi, se va utiliza indicele "s", iar pentru tensiunile produse de câmpurile asimetrice de temperaturi se va utiliza indicele "as", [17,28,106-109,113,114,119,122,125,126,131,134].

4.3.1 Determinarea tensiunilor termice simetrice

În acest subcapitol, tensiunile termice produse de câmpurile de temperaturi radial simetrice vor fi calculate pentru fiecare din cele cinci diagrame izocrone de temperatură, rezultate din prelucrarea diagramelor rezultate la laminarea experimentală folosind module analogice și tehnica electronică de calcul, prezentate în capitolul 3.

Variația câmpurilor de temperaturi radial simetrice, respectiv variațiile temperaturilor medii " $\bar{t}$ ", produc în cilindri de laminare, la fiecare trecere, tensiuni variabile având valori specifice ciclului de laminare la cald. Tensiunilor termice produse de câmpurile de temperaturi radial simetrice din cilindri de laminare la cald se determină cu relațiile (4.5), (4.6) și (4.7), [17,28,113,114, 119,122,125,126, 131,134].

$$\sigma_{rr}^s(\rho, \tau) = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[\int_0^1 \bar{t}(\rho, \tau) \rho d\rho - \frac{1}{\rho^2} \int_0^\rho \bar{t}(\rho, \tau) \rho d\rho \right] \quad (4.5)$$

$$\sigma_{\phi\phi}^s(\rho, \tau) = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[\int_0^1 \bar{t}(\rho, \tau) \rho d\rho + \frac{1}{\rho^2} \int_0^\rho \bar{t}(\rho, \tau) \rho d\rho - \bar{t}(\rho, \tau) \right] \quad (4.6)$$

$$\sigma_{zz}^s(\rho, \tau) = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[2 \int_0^1 \bar{t}(\rho, \tau) \rho d\rho - \bar{t}(\rho, \tau) \right] \quad (4.7)$$

În care: $\bar{t}(\rho, \tau)$ - temperatura medie, respectiv integrala funcției care descrie variația

câmpurilor de temperaturi, reprezentate prin curbele exponențiale;

ρ -raza specifică în secțiunea radială a cilindrilor, $\rho = r / R$;

α - coeficient de dilatare liniară;

E- modul de elasticitate longitudinal;

ν - coeficient de contracție transversală;

$\bar{t}$ - temperatura medie.

Valorile tensiunilor produse de câmpurile de temperaturi simetrice s-au determinat după rezolvarea numerică a relațiilor (4.5), (4.6), (4.7), iar valorile integralelor din aceste relații s-au obținut aplicând relația lui Simpson, prezentată în capitolul 2.

În aceste relații de calcul are importanță și temperatura inițială de încălzire a cilindrilor de laminare, când timpul $\tau = 0$, cunoscându-se faptul că, după regula lui l'Hospital, avem următoarea valoare calculată cu relația, [112-114]:

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{1}{\rho} \int_0^\rho (T - T_0) \rho d\rho = \frac{1}{2} (T - T_0)_{\rho=0} \quad (4.8)$$

În care: T- temperatura medie la anumite nivele din secțiunea radială a cilindrului, $T = \bar{t}$;

T_0 – temperatura inițială de încălzire a cilindrilor de laminare, $T_0 = 50^\circ\text{C}$.

În toate calibrele cilindrilor de laminare, determinarea tensiunilor termice produse de câmpurile de temperaturi simetrice s-a făcut pentru adâncimile Δr , sub suprafața calibrelor din secțiunea radială a cilindrilor de laminare. Aceste adâncimi corespund cu nivelele la care s-au determinat variațiile de temperaturi în cilindri degrositori de laminare. Aceste nivele sunt: $\Delta r = 0,2; 1,5; 3; 6; 98\text{mm}$. Acțiunea câmpurilor simetrice de temperaturi, produce numai tensiuni principale cum sunt: σ_{rr}^s - tensiuni radiale; $\sigma_{\varphi\varphi}^s$ - tensiuni circumferențiale; σ_{zz}^s - tensiuni axiale, iar toate celelalte tensiuni, respectiv tensiunile tangențiale sunt egale cu zero, [112-114].

Calculul tensiunilor termice produse de câmpurile de temperaturi simetrice se realizează pe baza relațiilor (4.4), (4.5), (4.6) utilizându-se în acest scop diagramele izocrone de temperaturi obținute experimental pentru cilindri degrositori de laminare prezentate în fig.3.13....3.17, rezultatele fiind prezentate în tabelele 4.2, 4.3, respectiv 4.4.

Tabelul 4.2

Valorile tensiunilor radiale, σ_{rr}^s produse de câmpurile simetrice de temperaturi

Adânc. Δr [mm]	Raza specifică în secțiunea radială $\rho = \frac{r}{R}$	$\int_0^1 \bar{t}_{(\rho, F_0)} \rho d\rho$	$\frac{1}{\rho^2} \int_0^\rho \bar{t}_{(\rho, F_0)} \rho d\rho$	Tensiune radial simetrică $\sigma_{rr}^s [daN/mm^2]$
Diagrama izocronă din figura 3.13, cu n = 32,5rot/min				
0	1	23,11225	23,11225	0
1,5	0,9846938		22,39443	0,256261
3,0	0,9693877		21,591814	0,542795
6,0	0,9387755		21,128352	0,708251
98	0		17,423605	2,030846
Diagrama izocronă din figura 3.14, cu n = 65,2rot/min				
0	1	25,823582	25,823582	0
1,5	0,9846938		24,68527	0,406377
3,0	0,9693877		24,203865	0,5782389
6,0	0,9387755		23,66766	0,769664
98	0		23,05914	0,986905
Diagrama izocronă din figura 3.15, cu n = 95,3rot/min				
0	1	22,995325	22,995325	0
1,5	0,9846938		22,008065	0,35245
3,0	0,9693877		21,291526	0,608256
6,0	0,9387755		20,966677	0,724227
98	0		17,24995	2,051098
Diagrama izocronă din figura 3.16, cu n=150,7rot/min				
0	1	23,397734	23,397734	0
1,5	0,9846938		22,320742	0,384486
3,0	0,9693877		21,31516	0,743478
6,0	0,9387755		21,34882	0,7314622
98	0		17,60275	2,068809
Diagrama izocronă din figura 3.17, cu n = 226,4rot/min				
0	1	25,591083	25,591083	0
1,5	0,9846938		24,00609	0,565842
3,0	0,9693877		22,96887	0,93613
6,0	0,9387755		23,126978	0,879685
98	0		21,982275	1,288344

Tabelul 4.3

Valorile tensiunilor circumferențiale, $\sigma_{\varphi\varphi}^s$ produse de câmpurile simetrice de temperaturi

Adânc. Δr [mm]	Raza specifică în secțiunea radială $\rho = \frac{r}{R}$	$\int_0^1 \bar{t}_{(\rho, F_0)} \rho d\rho$	$\frac{1}{\rho^2} \int_0^{\rho} \bar{t}_{(\rho, F_0)} \rho d\rho$	$\bar{t}_{(\rho, F_0)}$	Tensiunile circumferențiale $\sigma_{\varphi\varphi}^s$ [daN/mm ²]
Diagrama izocronă din figura 3.13, cu n=32,5rot/min					
0	1	23,11225	23,11225	233,37526	-83,31496
1,5	0,9846938		22,39443	187,80601	-66,79048
3,0	0,9693877		21,591814	137,85123	-48,670102
6,0	0,9387755		21,128352	104,84721	-36,722202
98	0		17,423605	104,84721	-35,399607
Diagrama izocronă din figura 3.14, cu n=65,2rot/min					
0	1	25,823582	25,823582	254,63496	-90,9046
1,5	0,9846938		24,68527	184,52471	-65,46894
3,0	0,9693877		24,203865	152,67694	-53,92742
6,0	0,9387755		23,66766	117,71828	-41,25576
98	0		23,05914	117,71828	-41,03852
Diagrama izocronă din figura 3.15, cu n=95,3rot/min					
0	1	22,995325	22,995325	230,23953	-82,19551
1,5	0,9846938		22,008065	168,79632	-59,90783
3,0	0,9693877		21,291526	124,1695	-43,72025
6,0	0,9387755		20,966677	104,49997	-36,58226
98	0		17,24995	104,49997	-35,25539
Diagrama izocronă din figura 3.16, cu n=150,7rot/min					
0	1	23,397734	23,397734	246,664	-88,05904
1,5	0,9846938		22,320742	179,63125	-63,74387
3,0	0,9693877		21,31516	118,30046	-41,48978
6,0	0,9387755		21,34882	105,2055	-36,826902
98	0		17,60275	105,2055	-35,48955
Diagrama izocronă din figura 3.17, cu n=226,4rot/min					
0	1	25,591083	25,591083	281,96502	-100,66151
1,5	0,9846938		24,00609	184,31451	-65,23443
3,0	0,9693877		22,96887	121,0654	-42,28421
6,0	0,9387755		23,126978	113,96455	-39,80565
98	0		21,982275	113,96455	-39,39699

Tabelul 4.4

Valorile tensiunilor axiale, σ_{zz}^s produse de câmpurile simetrice de temperaturi

Adânc. Δr [mm]	Raza specifică în secțiunea radială $\rho = \frac{r}{R}$	$\int_0^1 \bar{t}_{(\rho, F_0)} \rho d\rho$	$\bar{t}_{(\rho, F_0)}$	Tensiuni axiale $\sigma_{zz}^s [daN/mm^2]$
Diagrama izocronă din figura 3.13, cu n = 32,5rot/min				
0	1	23,11225	233,37526	-66,81282
1,5	0,9846938		187,80601	-50,54459
3,0	0,9693877		137,85123	-32,710742
6,0	0,9387755		104,84721	-20,928307
98	0		104,84721	-20,928307
Diagrama izocronădin figura 3.14, cu n = 65,2 rot/min				
0	1	25,823582	254,63496	-72,46664
1,5	0,9846938		184,52471	-47,43728
3,0	0,9693877		152,67694	-36,06763
6,0	0,9387755		117,71828	-23,58738
98	0		117,71828	-23,58738
Diagrama izocronădin figura 3.15, cu n = 95,3 rot/min				
0	1	22,995235	230,23953	-65,77685
1,5	0,9846938		168,79632	-43,84162
3,0	0,9693877		124,1695	-27,90984
6,0	0,9387755		104,49997	-20,88782
98	0		104,49997	-20,88782
Diagrama izocronă din figura 3.16, cu n = 150,7 rot/min				
0	1	23,397734	246,664	-71,35306
1,5	0,9846938		179,63125	-47,42237
3,0	0,9693877		118,30046	-25,52728
6,0	0,9387755		105,2055	-20,85238
98	0		105,2055	-20,85238
Diagrama izocronădin figura 3.17, cu n = 226,4rot/min				
0	1	25,591083	281,96502	-82,38947
1,5	0,9846938		184,31451	-47,528116
3,0	0,9693877		121,0654	-24,948313
6,0	0,9387755		113,96455	-22,413309
98	0		113,96455	-22,413309

Sinteza rezultatelor privind calculele tensiunilor termice simetrice determinate pentru fiecare din cele cinci diagrame izocrone de temperaturi din procesul de laminare experimental se prezintă în tabelul 4.5.

Tabelul 4.5

Sinteza rezultatelor calculelor tensiunilor termice produse de câmpurile de temperatură simetrice calculate pentru fiecare din cele cinci diagrame izocrone de temperaturi din procesul de laminare experimental

Diagrama izocronă, nr. de rotații [rot/min]	Adâncimea Δr [mm]	Valorile tensiunilor [daN/mm ²]		
		σ_{rr}^s	$\sigma_{\varphi\varphi}^s$	σ_{zz}^s
Fig.3.13 n = 32,5rot/min	0	0	-83,31496	-66,81282
	1,5	0,256261	-66,79048	-50,54459
	3,0	0,542795	-48,670102	-32,710742
	6,0	0,708251	-36,722202	-20,928307
	98	2,030846	-35,399607	-20,928307
Fig.3.14 n = 65,2rot/min	0	0	-90,9046	-72,46664
	1,5	0,406377	-65,46894	-47,43728
	3,0	0,5782389	-53,92742	-36,06763
	6,0	0,769664	-41,25576	-23,58738
	98	0,986905	-41,03852	-23,58738
Fig.3.15 n = 95,3rot/min	0	0	-82,19551	-65,77685
	1,5	0,35245	-59,90783	-43,84162
	3,0	0,608256	-43,72025	-27,90984
	6,0	0,724227	-36,58226	-20,88782
	98	2,051098	-35,25539	-20,88782
Fig.3.16 n = 150,7rot/min	0	0	-88,05904	-71,35306
	1,5	0,384486	-63,74387	-47,42237
	3,0	0,743478	-41,48978	-25,52728
	6,0	0,7314622	-36,826902	-20,85238
	98	2,068809	-35,48955	-20,85238
Fig.3.17 n = 226,4rot/min	0	0	-100,66151	-82,38947
	1,5	0,565842	-65,23443	-47,528116
	3,0	0,93613	-42,28421	-24,948313
	6,0	0,879685	-39,80565	-22,413309
	98	1,288344	-39,39699	-22,413309

4.3.2 Determinarea tensiunilor termice asimetrice

Câmpurile de temperatură radial asimetrice produc tensiuni termice ciclice la fiecare rotație a cilindrilor de laminare, generând oboseala termică în stratul superficial al calibrelor de laminare. Determinarea relațiilor matematice pentru calculul numeric al acestor tensiuni produse de câmpurile asimetrice de temperatură, care acționează în cilindrii de laminare s-a făcut pe baza analizei lucrării [24]. Astfel, determinarea tensiunilor termice asimetrice se realizează pe baza relațiilor (4.9), (4.10), (4.11) și (4.12), [17,28,36,37,113,114, 119,122,125].

$$\sigma_{rr}^{as} = -\frac{E\alpha}{2(1-\nu)} \frac{\rho}{R} \left[\frac{1}{\rho^2} - 1 \right] [t(1, \varphi) - \bar{t}] \quad (4.9)$$

$$\sigma_{r\varphi}^{as} = \frac{E\alpha}{2(1-\nu)} \frac{\rho}{R} \left[\frac{1}{\rho^2} - 1 \right] \frac{\partial [t(1, \varphi) - \bar{t}]}{\partial \varphi} \quad (4.10)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^{as} = -\frac{E\alpha}{2(1-\nu)} \frac{\rho}{R} \left[3 - \frac{1}{\rho^2} \right] [t(1, \varphi) - \bar{t}] \quad (4.11)$$

$$\sigma_{zz}^{as} = E\alpha \left\{ \frac{\nu}{1-\nu} \frac{\rho}{R} \left(2 - \frac{1}{\rho^2} \right) [t(1, \varphi) - \bar{t}] - t(\rho, \varphi) \right\} \quad (4.12)$$

În care: $\bar{t}$ - integrala curbei exponențiale de variație a temperaturii, după funcția $(1, \varphi)$, care

descrie temperatura pe suprafața cilindrului;

ν - coeficient de contracție transversală, $\nu = 0,3$;

α - coeficient de dilatare liniară.

$r/R = \rho$,

G - modul de elasticitate transversal, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$;

Câmpurile radial asimetriche de temperaturi produc tensiuni pe suprafața și în secțiunea radială a calibrelor cilindrilor de laminare, în zona unghiului de introducere a căldurii în cilindru - φ_1 . Valorile acestor tensiuni se situează la toate trecerile, în zona unghiurilor de prindere, respectiv acoperă zona focarului de deformare la contactul dintre laminatul incandescent și cilindri. Unghiul de introducere al căldurii în cilindri reprezintă unghiul în care valorile de temperatură pe suprafața acestora sunt mai mari decât temperatura medie $\bar{t}(1, \varphi)$ reprezintă integrala funcției exponențiale care descrie variațiile de temperaturi pe suprafața cilindrului de laminare, [17,112-114].

Datorită volumului foarte mare de operații de calcul, rezolvarea numerică a ecuațiilor pentru determinarea tensiunilor termice asimetriche s-a realizat cu ajutorul tehnicii electronice de calcul, după un program Microsoft Acces, realizat de autoarea acestei teze de abilitare, program prezentat în lucrările [113,114,131].

Rezultatele calculelor obținute cu ajutorul tehnicii electronice de calcul, reprezentând valorile tensiunilor produse de câmpurile asimetriche de temperaturi din cilindrii cajelor degrositoare se prezintă detaliat pentru fiecare din cele patru tensiuni $\sigma_{rr}^{as}, \sigma_{\varphi\varphi}^{as}, \sigma_{zz}^{as}, \sigma_{r\varphi}^{as}$ în lucrările [110,113,114,119,120,121], iar în cadru acestei lucrări se prezintă în tabelele 4.6...4.9.

Sinteza rezultatelor calculelor numerice ale tensiunilor termice radiale σ_{rr}^{as} , produse de câmpurile asimetriche de temperaturi sunt prezentate în tabelul 4.6. Aceste tensiuni sunt egale cu zero la suprafața cilindrului ($\Delta r = 0,2$) iar în stratul superficial au valori subunitare. Aceste rezultate confirmă condițiile impuse de teoria termoelasticității pentru tensiunile radiale care, pe suprafața cilindrului sunt egale cu zero.

Tabelul 4.6

Sinteza rezultatelor calculelor tensiunilor termice produse de câmpurile de temperaturi asimetriche după diagrama izocronă din fig.3.13, $n=32,5$ rot/min

Divizi φ_1	$\Delta r = 0,2 \text{ mm}$				$\Delta r = 1,5 \text{ mm}$				$\Delta r = 3,0 \text{ mm}$				$\Delta r = 6,0 \text{ mm}$				$\Delta r = 98 \text{ mm} = R$			
	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$
φ_3	0	0,0	-46,75	0,0	0,0	0,00	-36,27	-1,14	0,0	0,0	-32,48	-1,13	0,0	0,0	-20,24	-1,12	0,00	0	-19,05	-6,21
φ_4	0	0,15	-114,26	0,12	0,0	0,12	-39,84	-0,33	0,0	0,15	-33,9	-0,33	0,0	0,15	-24,43	-0,33	-8,76	-9,31	-26,85	-9,52
φ_5	0	0,2	-138,21	0,18	0,0	0,18	-66,29	0,12	0,0	0,2	-46,41	0,11	0,0	0,2	-24,44	0,11	-12,65	-11,35	-28,96	-11,40
φ_6	0	0,18	-115,64	0,20	0,0	0,20	-82,31	0,18	0,0	0,18	-48,85	0,16	0,0	0,18	-26,20	0,17	-11,61	-10,06	-31,02	-12,70
φ_7	0	0,16	-105,34	0,22	0,0	0,17	-94,16	0,20	0,0	0,16	-57,18	0,20	0,0	0,15	-29,45	0,19	-10,06	-8,32	-30,38	-13,35
φ_8	0	0,13	-87,31	0,25	0,0	0,13	-88,25	0,22	0,0	0,13	-52,02	0,21	0,0	0,13	-25,71	0,20	-8,32	-6,49	-27,53	-16,09
φ_9	0	0,1	-63,29	0,19	0,0	0,10	-84,25	0,25	0,0	0,1	-50,79	0,25	0,0	0,1	-24,98	0,25	-6,44	-4,30	-26,07	-9,58
φ_{10}	0	0,06	-59,16	0,15	0,0	0,06	-78,35	0,18	0,0	0,06	-47,77	0,18	0,0	0,06	-24,48	0,18	-4,3	-2,99	-25,14	-8,71
φ_{11}	0	0,02	-53,70	0,08	0,0	0,04	-72,04	0,15	0,0	0,04	-44,27	0,13	0,0	0,04	-23,96	0,10	-1,8	-1,08	-24,26	-5,22
φ_{12}	0	0,01	-49,8	0,05	0,0	0,02	-68,77	0,09	0,0	0,02	-38,14	0,08	0,0	0,02	-23,24	0,3	-0,46	-0,42	-23,01	-4,58
φ_{13}	0	0,0	-46,12	0,01	0,0	0,00	-63,15	0,00	0,0	0,0	-35,23	0,01	0,0	0,0	-23,01	0,0	0,00	0,00	-22,46	0,00

Tabelul 4.7

Sinteza rezultatelor calculelor tensiunile termice produse de câmpurile de temperaturi asimetrice după diagrama izocronă din fig.3.14, $n=65,2\text{rot/min}$

Diviz. φ_i	$\Delta r = 0,2 \text{ mm}$				$\Delta r = 1,5 \text{ mm}$				$\Delta r = 3,0 \text{ mm}$				$\Delta r = 6,0 \text{ mm}$				$\Delta r = 98 \text{ mm} = R$			
	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$
φ_1	0	0,0	-52,4	-1,25	0,0	0,00	-31,16	-0,5	0,0	0,0	-26,42	-0,48	0,0	0,0	-22,11	-0,42	0	0,00	-18,25	7,16
φ_2	0	0,0	-59,4	-0,53	0,0	0,00	-33,62	-0,29	0,0	0,0	-24,31	-0,19	0,0	0,00	-23,27	-0,15	-0,42	-0,68	-21,18	6,45
φ_3	0	0,10	-98,8	-0,5	0,0	0,15	-41,65	-0,16	0,0	0,14	-29,82	-0,11	0,0	0,12	-24,66	-0,11	-8,25	-7,44	-22,35	-1,76
φ_4	0	0,12	-118,6	-0,12	0,0	0,16	-55,21	-0,10	0,0	0,12	-31,33	0,02	0,0	0,10	-28,12	0,02	-9,14	-9,32	-23,51	-5,17
φ_5	0	0,13	-100,7	0,08	0,0	0,16	-62,37	0,08	0,0	0,10	-36,27	0,06	0,0	0,09	-32,18	0,06	-11,3	-6,99	-23,0	-11,0
φ_6	0	0,11	-95,3	0,07	0,0	0,11	-56,22	0,06	0,0	0,10	-30,96	0,07	0,0	0,06	-28,16	0,07	-4,25	-4,23	-22,15	-4,28
φ_7	0	0,07	-82,6	0,06	0,0	0,07	-48,34	0,05	0,0	0,09	-28,17	0,05	0,0	0,04	-24,19	0,025	-2,67	-1,25	-21,45	-1,60
φ_8	0	0,01	-57,8	0,02	0,0	0,04	-46,85	0,02	0,0	0,05	-27,16	0,02	0,0	0,02	-23,88	0,01	-1,22	-0,86	-20,65	-0,99
φ_9	0	0,00	-52,9	0,01	0,0	0,01	-42,62	0,01	0,0	0,02	-26,65	0,01	0,0	0,01	-22,45	0,01	-0,01	-0,25	-19,14	-0,64
φ_{10}	0	0,0	-48,1	0	0,0	0,00	-36,25	0,00	0,0	0,00	-25,14	0,00	0,0	0,00	-23,90	0,00	0	0,00	-19,05	0,00

Tabelul 4.8

Sinteza rezultatelor calculelor tensiunile termice produse de câmpurile de temperaturi asimetrice după diagrama izocronă din fig.3.15, $n=95,3\text{rot/min}$

Diviz. φ_i	$\Delta r = 0,2 \text{ mm}$				$\Delta r = 1,5 \text{ mm}$				$\Delta r = 3,0 \text{ mm}$				$\Delta r = 6,0 \text{ mm}$				$\Delta r = 98 \text{ mm} = R$			
	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$
φ_1	0	0,00	-50,87	-0,31	0,0	0,00	-24,57	-0,31	0,0	0,00	-15,55	-0,31	0,0	0,00	-13,24	-0,30	0,00	0,00	-13,31	18,60
φ_2	0	0,06	-76,51	-0,17	0,0	0,06	-29,64	-0,17	0,0	0,05	-16,27	-0,17	0,0	0,06	-13,46	-0,16	-3,65	-2,96	-16,88	10,18
φ_3	0	0,09	-90,56	0,01	0,0	0,09	-34,77	-0,03	0,0	0,08	-16,99	-0,03	0,0	0,09	-14,46	-0,03	-5,65	-4,92	-17,73	2,26
φ_4	0	0,10	-93,68	0,08	0,0	0,11	-40,13	0,01	0,0	0,10	-17,32	0,01	0,0	0,10	-14,13	0,01	-6,10	-5,55	-18,10	-0,75
φ_5	0	0,08	-86,65	0,11	0,0	0,08	-45,50	0,07	0,0	0,09	-23,76	0,07	0,0	0,08	-15,98	0,20	-5,90	-3,09	-20,44	-4,34
φ_6	0	0,04	-68,48	0,08	0,0	0,04	-48,63	0,20	0,0	0,06	-24,63	0,20	0,0	0,04	-17,48	0,05	-2,65	-2,65	-21,31	-12,46
φ_7	0	0,01	-62,46	0,05	0,0	0,01	-48,17	0,08	0,0	0,04	-28,16	0,06	0,0	0,04	-19,98	0,02	-1,65	-1,42	-22,18	-5,04
φ_8	0	0,01	-54,66	0,02	0,0	0,01	-47,28	0,02	0,0	0,01	-29,62	0,02	0,0	0,01	-21,43	0,01	-0,53	-1,10	-23,64	-3,23
φ_9	0	0,00	-52,30	0,01	0,0	0,00	-46,53	0,01	0,0	0,00	-30,84	0,01	0,0	0,00	-23,46	0,00	-0,20	-0,08	-24,11	-1,33
φ_{10}	0	0,00	-50,87	0	0,0	0,00	-42,66	0,00	0,0	0,00	-30,43	0,00	0,0	0,00	-24,40	0,00	0,00	0,00	-24,49	0,00

Tabelul 4.9

Sinteza rezultatelor calculelor tensiunile termice produse de câmpurile de temperaturi asimetrice după diagrama izocronă din fig.3.16, $n=150,7 \text{ rot/min}$

Diviz. φ_i	$\Delta r = 0,2 \text{ mm}$				$\Delta r = 1,5 \text{ mm}$				$\Delta r = 3,0 \text{ mm}$				$\Delta r = 6,0 \text{ mm}$				$\Delta r = 98 \text{ mm} = R$			
	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$
φ_2	0	0,00	-56,26	-0,12	0,0	0,00	-23,34	-0,12	0,0	0,00	-20,48	-0,12	0,0	0,00	-19,91	-0,12	0,00	0,00	-19,91	7,74
φ_3	0	0,02	-66,92	-0,22	0,0	0,02	-23,46	-0,22	0,0	0,02	-20,71	-0,22	0,0	0,02	-20,23	-0,22	-1,52	-1,78	-22,76	13,67
φ_4	0	0,06	-85,77	-0,08	0,0	0,06	-29,12	-0,07	0,0	0,06	-21,46	-0,07	0,0	0,06	-20,71	-0,07	-4,20	-5,25	-23,86	4,89
φ_5	0	0,08	-95,76	0,00	0,0	0,08	-34,96	0,00	0,0	0,08	-21,96	0,00	0,0	0,08	-21,47	0,00	-5,15	-8,15	-24,13	0,00
φ_6	0	0,09	-90,77	0,01	0,0	0,09	-38,72	0,01	0,0	0,09	-23,72	0,01	0,0	0,09	-21,98	0,01	-5,63	-6,45	-24,26	-2,71
φ_7	0	0,05	-75,11	0,14	0,0	0,05	-41,28	0,13	0,0	0,04	-25,87	0,13	0,0	0,04	-22,46	0,13	-4,91	-4,91	-24,62	-8,45
φ_8	0	0,03	-66,72	0,07	0,0	0,02	-40,53	0,07	0,0	0,02	-27,90	0,07	0,0	0,03	-23,98	0,07	-2,41	-3,25	-24,77	-2,58
φ_9	0	0,01	-58,90	0,04	0,0	0,01	-39,67	0,04	0,0	0,01	-30,81	0,04	0,0	0,01	-24,48	0,04	-1,01	-1,52	-24,99	-1,33
φ_{10}	0	0,00	-57,25	0,00	0,0	0,00	-32,16	0,00	0,0	0,00	-31,48	0,00	0,0	0,00	-24,99	0,00	0,00	0,00	-25,07	0,00

Tabelul 4.10

Sinteza rezultatelor calculelor tensiunile termice produse de câmpurile de temperaturi asimetrice după diagrama izocronă din fig.3.17, $n=226,4\text{rot/min}$

Diviz. φ_i	$\Delta r = 0,2 \text{ mm}$				$\Delta r = 1,5 \text{ mm}$				$\Delta r = 3,0 \text{ mm}$				$\Delta r = 6,0 \text{ mm}$				$\Delta r = 98 \text{ mm} = R$			
	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$	σ_{rr}^{as}	$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	σ_{zz}^{as}	$\sigma_{r\varphi}^{as}$
φ_4	0	0,00	-47,51	0,00	0,0	0,00	-22,56	-0,53	0,0	0,00	-18,22	-0,44	0,0	0,00	-16,35	-0,49	0,00	0,00	-12,67	6,61
φ_5	0	0,12	-49,06	-0,02	0,0	0,12	-23,04	-0,25	0,0	0,12	-19,06	-0,31	0,0	0,12	-16,02	-0,40	-1,16	-2,36	-13,41	12,25
φ_6	0	0,18	-51,33	-0,31	0,0	0,18	-34,60	-0,15	0,0	0,17	-19,98	-0,17	0,0	0,16	-17,34	-0,12	-3,35	-6,25	-14,20	3,29
φ_7	0	0,20	-55,93	-0,38	0,0	0,21	-38,01	0,12	0,0	0,22	-21,02	0,01	0,0	0,23	-18,16	0,09	-4,18	-7,91	-14,89	-0,24
φ_8	0	0,29	-58,10	0,01	0,0	0,29	-39,65	0,11	0,0	0,30	-22,04	0,03	0,0	0,30	-19,02	0,13	-7,19	-7,02	-15,03	-3,42
φ_9	0	0,31	-56,40	0,05	0,0	0,30	-37,42	0,95	0,0	0,31	-21,91	0,25	0,0	0,31	-18,38	0,88	-5,43	-5,69	-14,21	-4,21
φ_{10}	0	0,27	-55,02	0,04	0,0	0,27	-35,22	0,63	0,0	0,27	-20,34	0,15	0,0	0,26	-17,89	0,67	-2,15	-4,01	-13,45	-2,45
φ_{11}	0	0,18	-48,65	0,03	0,0	0,18	-29,51	0,51	0,0	0,16	-20,00	0,10	0,0	0,17	-17,02	0,52	-1,74	-3,25	-12,16	-2,01
φ_{12}	0	0,09	-47,95	0,02	0,0	0,09	-26,44	0,48	0,0	0,09	19,02	0,09	0,0	0,09	-16,88	0,41	-0,95	-1,04	-11,09	-1,03
φ_{13}	0	0,00	-46,33	0,01	0,0	0,00	-24,16	0,26	0,0	0,00	18,34	0,83	0,0	0,00	-16,01	0,26	0,00	0,00	-10,71	0,00

Tensiunile produse de câmpurile asimetrice de temperatură nu se determină și nu acționează în toată secțiunea cilindrului de laminare, deoarece câmpurile de temperatură asimetrice se atenuează în stratul superficial la adâncimea de maximum $\Delta r = 20$ mm. Sub acest nivel temperaturile sunt practic egale în toată secțiunea cilindrului. Câmpurile de temperaturi asimetrice produc tensiunile asimetrice care nu acționează pe întreaga circumferință a cilindrului, ci numai pe o anumită porțiune care este cuprinsă în intervalul unghiului « φ_i », prin care se introduce căldură în cilindru, respectiv zona în care variațiile de temperaturi sunt mai mari decât temperatura medie. Acest interval din circumferința cilindrului cuprinde un anumit număr de diviziuni, iar tensiunile asimetrice se calculează numai pentru aceste diviziuni, unde temperatura variază după o funcție exponențială care se află deasupra liniei temperaturii medii, [17,28,36,37,113,114,119-122].

Din tabelele anterior prezentate se observă că tensiunile radiale au valori nule pentru toate diagramele izocrone de temperaturi.

În ceea ce privește tensiunile circumferențiale « $\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$ » produse de câmpurile asimetrice de temperaturi, acestea sunt egale cu zero pe suprafața calibrelor și în punctele extreme ale segmentelor de linie ce reprezintă abscisa câmpului asimetric de temperaturi. Valorile tensiunilor pentru diviziunile intermediare sunt pozitive, dar subunitare, astfel că din punct de vedere practic, toate tensiunile asimetrice circumferențiale pot fi considerate nule, [17,28,36,37,113,114,119-122, 141].

Tensiunile axiale « σ_{zz}^{as} » produse de câmpurile asimetrice de temperaturi au valori mari pe suprafața cilindrului și în stratul superficial (până la adâncimi de $\Delta r = 15-20$ mm), produc compresiune și au valori excesiv de mari la viteze mici de rotație, [17,28,36,37,113,114,119-122, 141].

La laminarea experimentală corespunzătoare diagramei izocronă de temperaturi prezentată în fig.3.13 cu $n = 32,5$ rot/ min, pentru diviziunea « φ_5 » pe suprafața cilindrului a rezultat tensiunea $\sigma_{zz}^{as} = 138,21$ daN/mm², iar pentru diagrama din fig.3.14 având numărul de rotații $n = 65,2$ rot/ min la nivelul suprafeței cilindrului când $\Delta r = 0,2$ mm, în zona aceleiași diviziuni « φ_5 » tensiunile axiale « σ_{zz}^{as} » depășesc valoarea - 100 daN/mm². Acțiunea acestor tensiuni se manifestă pe o durată foarte scurtă de timp, de ordinul zecimilor de secundă sau la unele treceri de ordinul secundelor, fiind tensiuni care produc compresiune. Aceste tensiuni asimetrice au un caracter ciclic, se repetă la fiecare rotație a cilindrului și sunt extrem de periculoase, ele fiind preponderent responsabile de producerea oboselii termice a cilindrului de laminare la cald, [17,28,36,37,113,114,119-122, 141].

Tensiunile termice tangențiale « $\sigma_{r\varphi}^{as}$ » produse de câmpurile asimetrice de temperaturi, care pe suprafața cilindrului și în stratul superficial au valori subunitare. La extremitatea dreaptă a segmentului care reprezintă pe abscisă unghiul de introducere al căldurii în cilindrii φ_i , aceste tensiuni sunt egale cu zero. În mod practic, pentru toată plaja de acțiune a acestor tensiuni, ele pot fi considerate nule, [17,28,36,37,113,114,119-122, 141].

4.4 Determinarea tensiunilor echivalente

Tensiunile rezultante în urma solicitărilor complexe la care sunt supuși cilindri de laminare s-au determinat după teorema superpoziției efectelor, teoremă care admite obținerea tensiunilor rezultante ca sumă algebrică a tensiunilor produse de solicitările mecano-termice, fig.4.3, [17,28,113,114,122,125]. Valorile tensiunilor de solicitare pe axele principale de coordonate rezultă din însumarea algebrică a tensiunilor de încovoiere, presiunile de contact și a tensiunilor produse de câmpurile de temperatură radial simetrice și asimetrice, după schema prezentată în fig.4.3. Aceste tensiuni principale se calculează pentru fiecare trecere din ciclul de laminare a semifabricatului, pentru fiecare din cele cinci diagrame izocrone de temperatură. În acest sens, au fost luate în considerare tensiunile de încovoiere, precum și tensiunile de presiune de contact prezentate în tabelul 4.1 acestea fiind produse de forțele de laminare ce se repetă ciclic la fiecare rotație a cilindrului în zona focarului de deformare limitat la unghiul de prindere α . Tensiunile produse de presiunea de contact dintre cilindri și metalul care se laminează sunt determinate numai pentru suprafețele cilindrului de laminare. În continuare sunt calculate tensiunile principale „ σ_1 ”, „ σ_2 ”, „ σ_3 ” pentru starea de tensiune triaxială, corespunzător fiecăreia din cele trei axe principale de coordonate prezentate în fig.4.3, [113,114, 120].

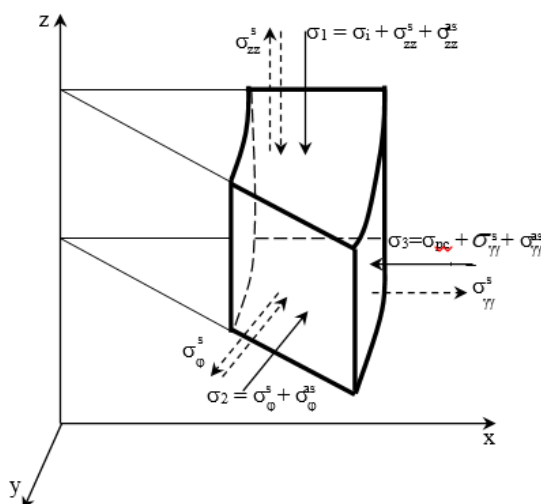


Fig.4.3 Schema de acțiune a tensiunilor componente pentru determinarea tensiunilor principale rezultante

σ_i – tensiunea rezultantă pe axa cilindrului z ;

σ_2 – tensiunea rezultantă circumferențială;

σ_1 – tensiunea rezultantă radială

Aplicând teoria energiei de deformare s-au determinat tensiunile echivalente după relațiile prezentate în literatura de specialitate pentru anumite nivele $r = R - \Delta r$, din secțiunea radială a calibrelor cilindrilor de laminare. Tensiunile echivalente s-au calculat cu relația:

$$\sigma_{ech} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu[\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3]} \quad (4.13)$$

în care: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – tensiuni principale rezultante;

$$\sigma_1 = \sigma_i + \sigma_{zz}^s + \sigma_{zz}^{as}; \quad \sigma_2 = \sigma_{\varphi\varphi}^s + \sigma_{\varphi\varphi}^{as}; \quad \sigma_3 = \sigma_{pc} + \sigma_{rr}^s + \sigma_{rr}^{as}$$

În relația (4.13) „ ν ” este coeficient de contracție transversală și are valoarea $\nu = 0,3$. Rezultatele calculelor tensiunilor principale și a celor echivalente se prezintă în tabelul 4.11.

Tabelul 4.11

Sinteza calculului tensiunilor rezultante $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ și echivalente σ_{ech} pentru cele cinci diagrame izocrone

Diagrama izocronă din figura 3.13, $n = 32,5 \text{ rot/min}$					
Tensiunea	Valorile tensiunilor rezultante și echivalente [daN/mm^2]				
	$\Delta r = 0,2 \text{ mm}$	$\Delta r = 1,5 \text{ mm}$	$\Delta r = 3,0 \text{ mm}$	$\Delta r = 6,0 \text{ mm}$	$\Delta r = 98 \text{ mm} = R$
σ_i	1,236	1,217	1,198	1,160	0
σ_{pc}	1,46	-	-	-	-
σ_{rr}^s	0	0,296261	0,5422795	0,708251	2,030846
$\sigma_{\varphi\varphi}^s$	-83,31496	-66,79048	-48,670102	-36,72202	-35,399607
σ_{zz}^s	-66,81282	-50,54459	-32,710742	-20,928307	-20,928307
σ_{rr}^{as}	0	0	0	0	-12,65
$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	0,18	0,20	0,18	0,20	-11,35
σ_{zz}^{as}	-138,21	-94,16	-57,18	-29,45	-31,02
σ_1	-203,78682	-143,48759	-88,692742	-49,218307	-51,948307
σ_2	-83,13496	-66,59048	-48,490102	-36,52202	-46,749607
σ_3	1,46	0,256261	0,5422795	0,708251	-10,619154
σ_{ech}	196,1282	139,0050	87,6479	52,10283	53,95301

Continuare tabel 4.11

Diagrama izocronă din figura 3.14, $n = 65,2\text{rot/min}$					
Tensiunea	Valorile tensiunilor rezultante și echivalente [daN/mm ²]				
	$\Delta_r = 0,2 \text{ mm}$	$\Delta_r = 1,5\text{mm}$	$\Delta_r = 3,0\text{mm}$	$\Delta_r = 6,0\text{mm}$	$\Delta_r = 98\text{mm} = R$
σ_i	1,566	1,542	1,518	1,470	0
σ_{pc}	1,85	-	-	-	-
σ_{rr}^s	0	0,406377	0,5782389	0,769664	0,986905
$\sigma_{\varphi\varphi}^s$	-90,9046	-65,46894	-53,92742	-41,25576	-41,03852
σ_{zz}^s	-72,46664	-47,43728	-36,06763	-23,58738	-23,58738
σ_{rr}^{as}	0	0	0	0	-11,30
$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	0,13	0,16	0,14	0,12	-9,32
σ_{zz}^{as}	-118,6	-62,37	-36,27	-32,18	-23,51
σ_1	-189,50064	-108,26528	-70,81963	-54,29738	-47,09738
σ_2	-90,7746	-65,30894	-53,78742	-41,13576	-50,35852
σ_3	1,85	0,406377	0,5782389	0,769664	-10,313095
σ_{ech}	184,78079	108,56657	75,27648	57,83494	53,23915
Diagrama izocronă din figura 3.15, $n = 95,3\text{rot/min}$					
Tensiunea	Valorile tensiunilor rezultante și echivalente [daN/mm ²]				
	$\Delta_r = 0,2 \text{ mm}$	$\Delta_r = 1,5\text{mm}$	$\Delta_r = 3,0\text{mm}$	$\Delta_r = 6,0\text{mm}$	$\Delta_r = 98\text{mm} = R$
σ_i	1,552	1,528	1,505	1,420	0
σ_{pc}	1,83	-	-	-	-
σ_{rr}^s	0	0,35245	0,608256	0,724227	2,051098
$\sigma_{\varphi\varphi}^s$	-82,19551	-59,90783	-43,72025	-36,58226	-35,25539
σ_{zz}^s	-65,77685	-43,84162	-27,90984	-20,88782	-20,88782
σ_{rr}^{as}	0	0	0	0	-6,1
$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	0,1	0,11	0,1	0,1	-5,55
σ_{zz}^{as}	-93,68	-48,63	-30,84	-24,40	-24,49
σ_1	-157,90485	-90,94362	-57,24484	-43,86782	-45,37782
σ_2	-82,09551	-59,79783	-43,62025	-36,48226	-40,80539
σ_3	1,83	0,35242	0,608256	0,724227	-4,04802
σ_{ech}	155,44296	92,820162	60,9808	46,15779	49,19648
Diagrama izocronă din figura 3.16, $n=150,7\text{rot/min}$					
Tensiunea	Valorile tensiunilor rezultante și echivalente [daN/mm ²]				
	$\Delta_r = 0,2 \text{ mm}$	$\Delta_r = 1,5\text{mm}$	$\Delta_r = 3,0\text{mm}$	$\Delta_r = 6,0\text{mm}$	$\Delta_r = 98\text{mm} = R$
σ_i	1,811	1,783	1,755	1,700	0
σ_{pc}	2,142	-	-	-	-
σ_{rr}^s	0	0,384486	0,743478	0,7314622	2,068809
$\sigma_{\varphi\varphi}^s$	-88,05904	-63,74287	-41,48978	-36,826902	-35,48955
σ_{zz}^s	-71,35306	-47,42237	-25,52728	-20,85238	-20,85238
σ_{rr}^{as}	0	0	0	0	-5,63
$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	0,09	0,09	0,09	0,09	-8,15
σ_{zz}^{as}	-95,76	-41,28	-31,48	-24,99	-25,07
σ_1	-165,30206	-86,91937	-55,25228	-44,14238	-45,92238
σ_2	-87,96904	-63,65387	-41,39978	-36,736902	-35,39955
σ_3	2,142	0,384486	0,743478	0,7314622	-3,561191
σ_{ech}	163,30504	91,22512	58,63416	48,59205	47,17557

Diagrama izocronă din figura 3.17, $n=226,4\text{rot/min}$					
Tensiunea	Valorile tensiunilor rezultante și echivalente [daN/mm^2]				
	$\Delta r=0\text{mm}$	$\Delta r=1,5\text{mm}$	$\Delta r=3,0\text{mm}$	$\Delta r=6,0\text{mm}$	$\Delta r=98\text{mm}=R$
σ_i	1,466	1,443	1,421	1,376	0
σ_{pc}	1,73	-	-	-	-
σ_{rr}^s	0	0,565842	0,93613	0,879685	1,288344
$\sigma_{\varphi\varphi}^s$	-100,66151	-65,23443	-42,28421	-39,80565	-39,39699
σ_{zz}^s	-82,38947	-47,528116	-24,948313	-22,413309	-22,413309
σ_{rr}^{as}	0	0	0	0	-7,19
$\sigma_{\varphi\varphi}^{as}$	0,31	0,30	0,31	0,31	-7,91
σ_{zz}^{as}	-58,10	-39,65	-22,04	-19,02	-15,03
σ_1	-139,02347	-85,735116	-45,56713	-40,057309	-37,443309
σ_2	-100,04	-64,93443	-41,97421	-39,49565	-47,30699
σ_3	1,73	0,565842	0,93613	0,879685	-5,901656
σ_{ech}	125,78522	90,9844	52,35428	47,51845	48,08205

Tensiunile principale rezultante „ σ_1 ” și „ σ_2 ” au numai valori negative și produc compresie, cu valori excesiv de mari pe suprafața și în stratul superficial al cilindrilor. Tensiunile principale „ σ_3 ” sunt pozitive pe suprafață și numai în imediata apropiere de aceasta până la adâncimi mai mari de $\Delta r = 6$ mm, apoi spre interior devin negative până în axa cilindrilor, [109,113,114,127].

Cele mai mari valori absolute ale tensiunilor principale sunt cele din direcția axială „ σ_1 ”, ele au valori maxime la rotații mici ale cilindrilor de laminare, astfel că la diagrama izocronă efectuată cu $n = 32,5$ rot/min, aceste tensiuni au valoarea maximă $\sigma_1 = -203,78682$ daN/mm².

Tensiunile principale „ σ_1 ” care au direcția axială în cilindru au valori însemnate pe suprafața calibrelor depășind în mod frecvent 150 daN/mm² și produc *fisuri circulare* sub formă de crăpături în stratul superficial, fig.4.4. Aceste fisuri sunt perpendiculare pe direcția tensiunilor principale „ σ_1 ”. În procesul de exploatare, aceste fisuri se dezvoltă treptat, ajungând la unele crăpături cu deschiderea de peste 3...5 mm, crăpături ce se propagă în adâncime până la 20...30 mm. După cum se poate observa din tabelul 4.11, ponderea principală în valoarea tensiunilor principale axiale „ σ_1 ” o au tensiunile „ σ_{zz}^{as} ”, produse de câmpurile asimetrice de temperatură, care de fapt sunt responsabile de producerea fisurilor circulare pe calibrele cilindrilor de laminare la cald și dau aspectul caracteristic oboselii termice, [109,113,114,127].

Principala componentă a tensiunilor „ σ_2 ” sunt tensiunile „ $\sigma_{\varphi\varphi}^s$ ”, produse de câmpurile simetrice de temperatură. Aceste tensiuni principale circumferențiale „ σ_2 ”, produc pe suprafața cilindrilor de laminare *fisuri longitudinale*, paralele cu axa cilindrului – generatoare la tăblie, formând o „legătură” la rețea, conform reprezentărilor din fig.4.4. Aceste fisuri sunt fine, se dezvoltă treptat și ajung la o deschidere de 1...2 mm cu o adâncime de 8 ...10 mm, [109,113,114,127].

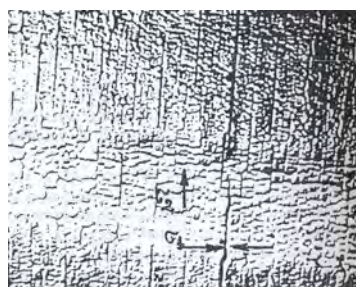


Fig.4.4. Acțiunea tensiunilor principale axiale σ_1 și circumferențiale σ_2 în stratul superficial al cilindrilor de laminare

Tensiunile principale radiale „ σ_3 ” pe suprafața cilindrilor au valori relativ mici atât la suprafața cât și spre interiorul cilindrului, dar cu valori neînsemnate în comparație cu tensiunile „ σ_1 ” și „ σ_2 ”, care au ponderea cea mai mare în valoarea tensiunilor echivalente, [112--114,120,122,127,131].

Valorile tensiunilor echivalente „ σ_{ech} ” sunt influențate preponderent de tensiunile „ σ_1 ” și „ σ_2 ”, care au valori maxime la viteze mici de rotație a cilindrilor de laminare la cald $n = 32,5$ rot/min, astfel că valoarea maximă din tabelul 4.11 este de $\sigma_{ech} = 196,1282 \text{ daN/mm}^2$.

Cilindrii de laminare pot suporta tensiunile principale „ σ_1 ” și „ σ_2 ” atât de mari în stratul superficial al calibrelor, numai pentru faptul că aceste tensiuni sunt de compresiune, acționează un timp relativ foarte scurt, de ordinul fracțiunilor de secundă sau la unele treceri cel mult una sau două secunde. În această situație, până la apariția fisurilor cu nuanțe de crăpături circumferențiale și longitudinale, materialul suportă tensiuni cu valori de trei-patru ori mai mari decât valorile tensiunilor de distrugere.

Astfel se poate concluziona că solicitările din cilindri de laminare au un caracter ciclic, se produc la fiecare rotație a cilindrilor, iar starea de tensiune este în principal rezultatul acțiunii câmpurilor de temperatură asimetrice și simetrice, care produc oboseala termică pe suprafață și în stratul superficial al cilindrilor de laminare la cald, [114].

4.5 Optimizarea tensiunilor din cilindri de laminare

Ca urmare a analizei tensiunilor complexe care apar în cilindrii de laminare s-a realizat optimizarea tensiunilor echivalente dat prin faptul că o optimizare directă a tensiunilor termice nu este posibilă. Astfel, s-au trasat graficele de optimizare $\sigma_{ech} = f(\Delta r)$ pentru laminarea cu $n = 32,5$ rot/min și $n = 226,4$ rot/min, cele două turații reprezentând limitele domeniului în care s-au înregistrat diagramele izocrone de temperatură, [113].

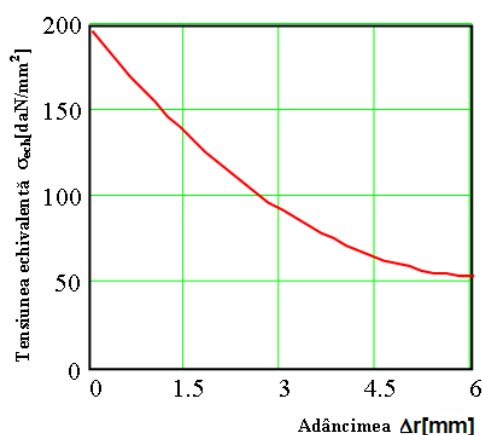


Fig.4.5 Diagrama de optimizare a tensiunilor echivalente pentru laminarea experimentală având numărul de rotații al cilindrilor $n = 32,5$ rot/min

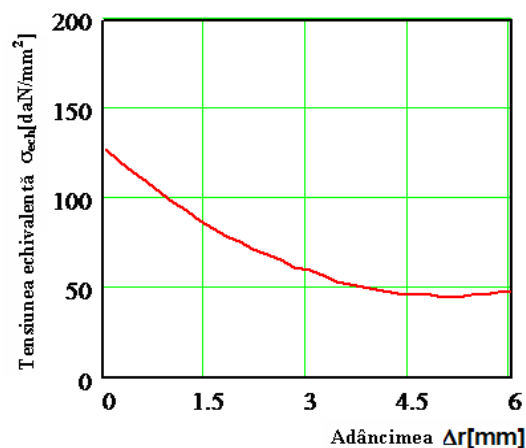


Fig.4.6 Diagrama de optimizare a tensiunilor echivalente pentru laminarea experimentală având numărul de rotații al cilindrilor $n = 226,4$ rot/min

Problema de optimizare este o problemă cu restricții, restricțiile problemei fiind $0 \leq \sigma_{ech} \leq 200$ și $0 \leq \Delta r \leq 6$, [113].

Funcțiile obiectiv ale graficelor de optimizare sunt:

$\sigma_{ech} = 3,656\Delta r^2 - 45,859\Delta r + 196,79$ pentru diagrama din fig.4.5, coeficientul de regresie în acest caz fiind 0,999 și $\sigma_{ech} = 3,197\Delta r^2 - 32,333\Delta r + 127,21$ pentru diagrama din fig.4.6, coeficientul de regresie în acest caz fiind 0,991. Comparând cele două grafice se constată că există un domeniu de optimizare, ceea ce înseamnă că pentru evitarea fenomenului de oboseală termică în exploatare, tensiunile echivalente din cilindri de laminare trebuie să aibă valori cuprinse în acest domeniu. Existența

acestui domeniu de optimizare permite formularea unor recomandări în vederea atenuării distrugerii calibrelor cilindrilor și evitarea ruperii acestora prin șocuri termice.

4.6 Concluzii

În acest capitol s-a realizat calculul tensiunilor echivalente care iau naștere ca urmare a solicitărilor variabile complexe din cilindrii de laminare aflați în exploatare. Calculul tensiunilor echivalente s-a realizat considerând superpoziția efectelor generate de tensiunile mecanice și cele termice produse de câmpurile de temperaturi simetrice și asimetrice specifice procesului de laminare la cald. Concluziile care sunt evidențiate la finalul acestui capitol sunt:

- cilindri de laminare suportă solicitări variabile complexe, generate pe de o parte de tensiunile mecanice, iar pe de altă parte de tensiunilor termice produse de câmpurile de temperaturi specifice procesului de laminare la cald ;
- tensiunile mecanice care solicită cilindrii de laminare în exploatare au valori nesemnificative comparativ cu tensiunile termice produse de câmpurile de temperaturi;
- variația câmpurilor de temperatură radial simetrice, respectiv variațiile temperaturilor medii $\bar{t}$, produc în cilindrii de laminare la fiecare trecere tensiuni variabile având valori specifice ciclului de laminare la cald ;
- câmpurile de temperatură radial asimetrice produc tensiuni termice ciclice la fiecare la fiecare rotație a cilindrilor de laminare, generând oboseala termică în stratul superficial al calibrelor de laminare;
- acțiunea în ansamblu a tensiunilor termice prezintă un aspect de distrugere a stratului superficial care caracterizează efectul acțiunii oboselii termice ;
- fisuri specifice fenomenului de oboseală termică, au direcția circumferențială cu un caracter deosebit de pronunțat, care se dezvoltă progresiv în stratul superficial ajungând până la crăpături adânci, în același timp pe suprafața calibrului de laminare apar fisuri având o direcție generatoare la suprafața calibrului, formând astfel aspectul general al oboselii termice ;
- solicitările din cilindrii de laminare au un caracter ciclic, se produc la fiecare rotație a cilindrilor, iar starea de tensiune este în principal rezultatul acțiunii câmpurilor de temperaturi asimetrice și simetrice, care produc oboseala termică pe suprafață și în stratul superficial al cilindrilor de laminare la cald.

Separarea câmpurilor de temperaturi care produc tensiunile termice în simetrice și asimetrice și confirmarea lor constituie **GRADUL DE ORIGINALITATE** al acestor cercetări.

CAPITOLUL 5

DETERMINAREA REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ TERMICĂ A CILINDRILOR DE LAMINARE LA CALD

5.1 Importanța determinării rezistenței la oboseală termică

Cunoașterea rezistenței la oboseală termică a cilindrilor de laminare constituie un factor important în evaluarea durabilității acestora în exploatare. O durabilitate scăzută mărește timpii de schimbare a calibrelor cilindrilor, crește manopera aferentă recalibrărilor la care se adaugă cantitatea de bare rebutate pentru reglarea liniei de laminare, toate acestea influențând productivitatea utilajului. Evaluarea durabilității cilindrilor de laminare se face printr-un indicator economic care reprezintă consumul de cilindri, în kg/tona de oțel laminat (produs finit laminor). Acest indicator este eficient însă numai pentru a compara consumul de cilindri între laminoarele de același tip, [12,17,38,92, 96,106,107,115-117,123,133].

Un alt procedeu de evaluare a durabilității de exploatare permite compararea calității cilindrilor care lucrează în condiții identice și se referă la cantitatea de laminate (exprimată în tone) raportată la 1 mm din diametrul cilindrului, îndepărtat prin recalibrare, [17,46,54,96].

Al treilea procedeu presupune evaluarea durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare în număr de cicluri de solicitare la oboseală termică, până la apariția pe suprafața calibrelor a primelor fisuri specifice acestui fenomen, [17,54,96].

În acest capitol se prezintă studiile efectuate asupra durabilității unor materiale din care sunt realizați cilindri de laminare prin determinarea rezistenței la oboseală termică.

În acest sens, cercetările experimentale au fost realizate în mai multe etape. În prima etapă s-au analizat consecințele efectelor solicitărilor din exploatare care au dus la ruperea cilindrilor de laminare la cald, analiză realizată pe baza datelor existente într-un raport de analiză, aparținând combinatului siderurgic hunedorean, efectuat pe o perioadă de șase luni, concluziile analizei fiind prezentate în capitolul 2 al acestei lucrări. A doua etapă a impus cunoașterea regimului termic al cilindrilor de laminare, care a fost cercetat într-un laminor experimental realizat la scara 1:5 față de un laminor degrosisor existent în secția « Bluming » din cadrul aceleiași combinat siderurgic, laminor existent în laboratorul de « Sisteme mecanice industriale » din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara, prezentat în capitolul 3. Acest studiu a fost realizat cu scopul cunoașterii variațiilor de temperaturi pe suprafața și în secțiunea transversală a cilindrilor în timpul laminării. În etapa a treia s-au determinat tensiunile mecanice, termice și echivalente care acționează asupra cilindrilor de laminare la cald, cu scopul cunoașterii nivelului de tensiuni care produc oboseală termică. În etapa a patra s-a studiat durabilitatea unor materiale din care sunt realizați cilindri de laminare prin determinarea rezistenței la oboseală termică apreciată prin numărul real de cicluri de solicitare până la care apar primele fisuri de oboseală termică.

Cercetările de rezistență la oboseală termică a cilindrilor de laminare la cald s-au efectuat pe o instalație realizată în cadrul grantului de cercetare obținut prin competiție la nivel național AT, Nr. 32 940/22.06.2005cod CNCIS 24, Tema 7, [112], directorul grantului fiind autoarea prezentei lucrări .

5.2 Prezentarea instalației experimentale pentru determinarea rezistenței la oboseală termică

5.2.1 Construcția instalației

În cadrul acestui subcapitol se prezintă elementele constructive și funcționale ale instalației pentru determinarea durabilității materialelor din care sunt realizați cilindri de laminare, prin evaluarea rezistenței la oboseală termică. Principiul experimentărilor presupune montarea unor probe sub formă de inele pe axul central al instalației, probe realizate din diferite materiale destinate fabricării cilindrilor

de laminare. La punerea în funcțiune a instalației, probele experimentale se rotesc, timp în care la partea superioară a instalației sunt încălzite într-un cuptor electric, iar la partea inferioară sunt răcite într-un mediu de răcire. Probele sunt supuse experimentărilor până la apariția pe suprafața lor a primelor fisuri specifice fenomenului de oboseală termică. Ansamblul instalației se prezintă în fig.5.1, iar în fig.5.2 este prezentată schema constructivă și elementele componente ale acesteia, [112,114-117, 121,123,127].



Fig.5.1 Ansamblul instalației pentru determinarea rezistenței la oboseală termică a cilindrilor de laminare la cald

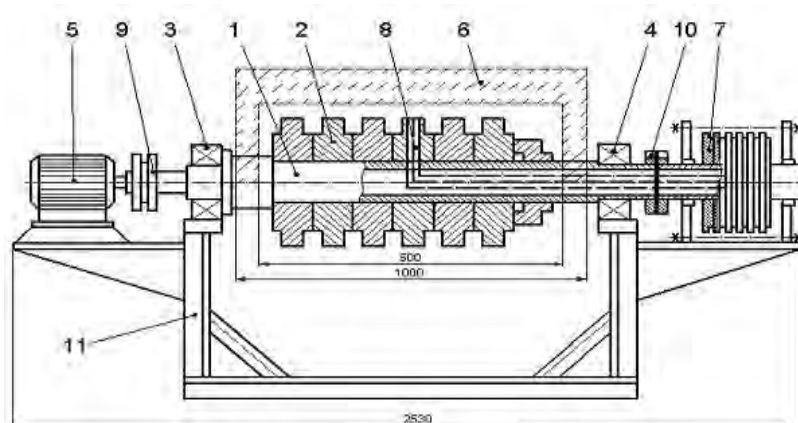


Fig.5.2 Schema constructivă a instalației pentru determinarea rezistenței la oboseală termică
1-ax principal, 2-probe experimentale, 3,4 –lagăre, 5- motor electric asincron, 6-cuptor electric cu rezistori, 7-colector de termotensiune, 8-bolț cu termocuple, 9,10 - cuplaje, 11-structură metalică

Instalația experimentală se compune din axul principal 1, pe care se montează probele experimentale 2 realizate sub formă de inele, executate din mărcile de oțeluri și fonte din care sunt realizați cilindri de laminare la cald. Axul principal se sprijină pe lagărele 3 și 4, acesta fiind antrenat de un motor electric asincron 5, având puterea de 2,2 kW, comandat de către un convertor static de frecvență trifazat. Încălzirea probelor se realizează prin intermediul cuptorului 6, cu rezistori electrice. Arborele principal pe care sunt montate probele experimentale este asamblat direct cu motorul electric și cu colectorul de termotensiune, prin intermediul cuplajelor 9,10, iar întregul sistem este amplasat pe scheletul metalic 11, [112, 114-117,121,123,127].

5.2.2 Prezentarea instalației pentru încălzirea probelor

Conform principiului determinărilor experimentale prezentat la subpunctul 5.2.1, probele montate pe axul principal al instalației sunt supuse unor regimuri ciclice de încălzire-răcire, până la apariția primelor fisuri de oboseală termică. În acest scop, la partea superioară a instalației prezentată în fig.5.1 s-a amplasat un cuptor electric în formă de semicerc. Cuptorul electric are doi rezistori electrice R_1 și R_2 , fiecare compus din patru bucle rezistoare, așezate longitudinal, paralel cu axa arborelui principal, [112,114-117,121,123,127,130].

În fig.5.3 se prezintă o secțiune transversală prin cuptorul electric destinat încălzirii probelor. Acesta este compus dintr-o carcasă metalică 1, căptușită cu un material izolant termic 2, iar în interiorul cuptorului este turnat beton termostabil 3, cu degajări interioare 4, care constituie suport pentru rezistorii electrice R_1 și R_2 . În interiorul cuptorului există montat un termocuplu 5 care este conectat la un termometru electronic 6, cu ajutorul căruia se poate stabili și menține în cuptor o anumită temperatură prin intermediul unui sistem automat de comandă, iar 7 reprezintă duzele prin care se realizează răcirea probelor în timpul determinărilor experimentale, [112,114-117,121,123,127].

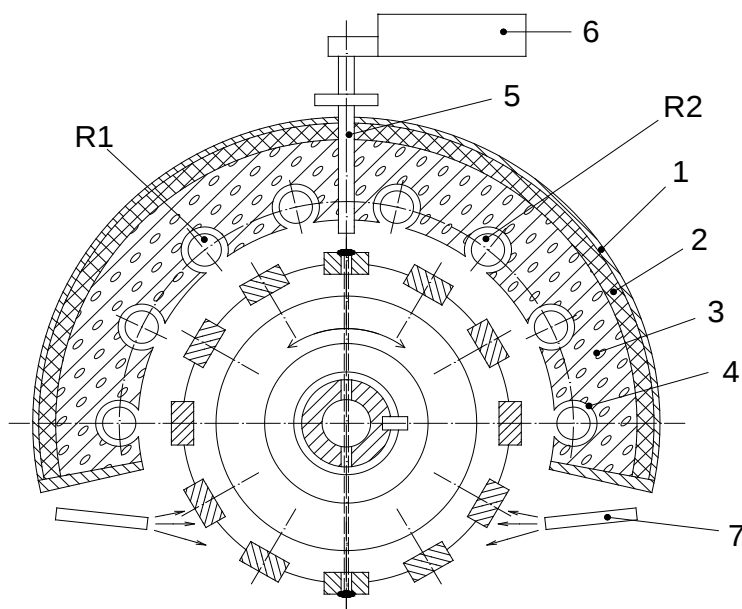


Fig.5.3 Schema secțiunii transversale prin cuptorul de încălzire a probelor și axul port probe
 1-carcasă metalică, 2-material izolant termic, 3-beton termostabil, 4-degajări interioare,
 5-termocuplu, 6-termometru electronic, 7-duze prin care se realizează răcirea probelor

Înregistrarea variațiilor de temperaturi în probele experimentale, s-a realizat prin conectarea instalației la un sistem de achiziție de date. În acest sens, s-au introdus termocuple Pt-Rh/Pt într-un bolț, care a fost introdus într-o probă experimentală, similar cu modul în care s-a determinat regimul termic al cilindrilor de laminare prezentat în capitolul 3. Termocuplele introduse în bolț sunt amplasate la adâncimile $\Delta r = 0,2; 1,5$ și $3,0$ mm de la suprafața probelor. Primul termocuplu amplasat la adâncimea de $\Delta r = 0,2$ mm se consideră termocuplu de suprafață unde variațiile de temperaturi sunt maxime, [112,114-117,121,123,127]. Instalația înregistrează variațiile de temperaturi atât pe suprafața probelor, cât și în secțiunea radială a acestora, sub forma unor fișiere cu date pe baza cărora se pot trasa diagrame izocrone de temperaturi, [112,114,123,127].

5.3 Alegerea mărcilor de oțeluri și fonte supuse experimentărilor

Alegerea materialelor utilizate în experimentările pentru determinarea rezistenței la oboseală termică au solicitat un studiu amănunțit, pentru fiecare laminor analizat. Pentru alegerea mărcilor de oțeluri și fonte supuse studiilor din acest capitol s-au analizat parametrii constructivi și proprietățile de comportare în exploatare a tuturor cilindrilor din cazele de lucru ale laminoarelor din combinatul siderurgic hunedorean. Astfel, s-au analizat cilindrii din patru laminoare industriale din punct de vedere al parametrilor constructivi, a proprietăților de comportare în exploatarea industrială, precum și după mărcile de oțeluri și fonte din care sunt realizați cilindrii acestora, sinteza rezultatelor analizei fiind prezentată în tabelul 2.2 din capitolul 2.

În tabelele 5.1 și 5.2 se prezintă compoziția chimică, respectiv proprietățile mecanice ale mărcilor de oțeluri și fonte alese pentru a fi supuse experimentărilor pentru determinarea rezistenței la oboseală termică a cilindrilor de laminare la cald, [112,114-117].

Tabelul 5.1

**Compoziția chimică a probelor reprezentând mărcile de oțeluri și fonte
din care sunt fabricați cilindri de laminare**

Marca oțelului/fontei	Nr. probe	C	Si	Mn	P	S	Mo	V	Cr	Ni	Obs.
55VMoCr12	1, 2	0,58	0,22	0,37	0,029	0,021	1,20	0,12	1,20	0,22	Cu 0,14
	3	0,56	0,23	0,41	0,030	0,021	0,32	0,17	1,11	0,29	Cu 0,19
90VMoCr15	1	0,87	0,26	0,34	0,022	0,027	0,23	0,17	1,52	0,21	Cu 0,16
	2, 3	0,90	0,24	0,35	0,025	0,023	0,21	0,15	1,49	0,18	Cu 0,14
65VMoCr15	1, 2, 3	0,65	0,34	0,72	0,021	0,020	0,45	0,18	1,56	0,21	Cu 0,16
OTA3	1, 2	1,91	0,72	0,83	0,034	0,015	0,36	-	1,14	1,62	Cu 0,17
	3	1,98	0,70	0,84	0,036	0,018	0,32	-	1,11	1,58	Cu 0,12
FNS 2	1, 2, 3	3,24	1,48	0,56	0,13	0,019	0,32	-	0,48	1,80	Mg 0,026
FD 2	1, 2	2,93	0,56	0,64	0,39	0,038	0,27	-	-	0,42	-
	3	2,99	0,53	0,65	0,47	0,030	0,32	-	-	0,37	-

Tabelul 5.2

**Proprietățile mecanice ale probelor reprezentând mărcile de oțeluri și fonte
din care sunt fabricați cilindri de laminare**

Marca oțelului sau a fontei	Nr. probe i inel	Duritate pe cilindru [HB]		Tensiunea la rupere σ_r [N/mm ²]		Tensiunea la curgere σ_c [N/mm ²]		Tensiunea la oboseală σ_{-1} [N/mm ²]		Gâtuirea Z [%]	
		Long	Tan	Long	Tan	Long	Tan.	Long	Tan.	Long	Tan
55VMoCr12	1, 2	280	218	810	770	460	430	400	380	31	16
	3	277	210	830	800	480	440	410	400	33	18
90VMoCr15	1	310	242	820	760	550	500	410	380	32	17
	2, 3	315	245	810	790	560	510	400	400	31	18
65VMoCr15	1, 2, 3	310	280	830	760	530	490	410	390	31	19
OTA3	1, 2	390	320	720	700	520	510	360	340	-	-
	3	396	333	710	690	520	510	350	340	-	-
FNS 2	1, 2, 3	422	267	600	580	430	420	240	230	-	-
FD 2	1, 2	514	293	680	660	490	480	270	260	-	-
	3	517	302	302	700	670	510	490	280	-	-

5.4 Prezentarea probelor experimentale

În vederea efectuării cercetărilor de rezistență la oboseală termică s-au realizat probe sub formă de inele realizate din mărci de oțeluri și fonte, utilizate la fabricarea cilindrilor de laminare, prezentate în tabelul 5.1. Astfel au fost realizate șase loturi experimentale, fiecare lot fiind compus din șase probe, dintre care patru din oțel și două din fontă, [112,114-117,121,123,127].

În fig.5.4 se prezintă dimensiunile unei probe experimentale realizată sub formă de inel. În vederea determinării variațiilor de temperaturi pe suprafața și în secțiunea radială a probelor, în inelul cu numărul 4 (de la stânga la dreapta în fig.5.2) s-a implantat un bolț conic în care s-au montat termocuple din Pt –Pt/Rh, cu diametrul sârmei de 0,06 mm și o inerție de răspuns sub o zecime de secundă. Aceste termocuple măsoară variațiile de temperaturi la suprafața probei $\Delta r = 0,2$ mm și la adâncimile $\Delta r = 1,5$ și 3 mm. În fig.5.5 se prezintă un termocuplu asamblat și pregătit pentru instalare în proba experimentală situată central pe axul cu probe, iar în fig.5.6 se prezintă o secțiune longitudinală prin bolțul conic în care au fost montate termocuplele, [112,114-117,121,123,127].

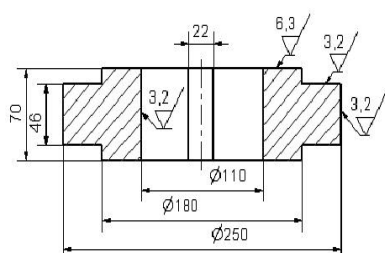


Fig.5.4 Schema constructivă a probei experimentale



Fig.5.5 Termocuplu asamblat și pregătit pentru instalare în inelul experimental



Fig. 5.6 Secțiune longitudinală printr-un termocuplu

În fig.5.7 se prezintă ansamblul unui lot de probe asamblat în instalația experimentală și cel de-al doilea lot în stare de așteptare.



Fig.5.7 Ansamblul a două loturi de probe, unul montat pe axul principal și unul în așteptare

5.5 Regimurile de solicitare termică pentru determinarea rezistenței la oboseală termică

Conform principiului determinărilor experimentale, prezentat în subcapitolul 5.2.1 s-au stabilit trei regimuri de lucru, caracteristicile acestora fiind prezentate în tabelul 5.3, [46,112, 114-117,121,123,127].

Tabelul 5.3

Caracteristicile regimurilor de solicitare

Regimul de experimentare	Nr. de rotații-experimentări I [rot/min]	Nr. de rotații-experimentări II [rot/min]	Temperatura mediului cuptorului [°C]	Mediul de răcire
A	35,7	93,0	≈ 1000	Aer
B	35,7	93,0	≈ 1000	Apă
C	35,7	93,0	≈ 1000	Zăpadă carbonică

Ordinea de realizare a experimentărilor în cele trei regimuri este: regimul A, apoi B și în final C.

5.6 Efectuarea experimentărilor

Turațiile probelor supuse experimentărilor s-au determinat după valorile numărului de rotații medii minime ale cilindrilor industriali de laminare rezultatele fiind prezentate în tabelul 5.4, [112].

Tabelul 5.4

Determinarea numărului minim de rotații a cilindrilor industriali de laminare

Determinarea numărului minim de rotații a cilindrilor industriali de laminare									
Denumirea laminorului	Profilul laminatului, rot /min, cilindrii K ₁ pregătitoare							Nr. rotații total	
Laminor Ø 650 mm	Brame pentru profile grele / Cajă degrositoare, 20 ... 70 rot /min							70	
Laminor profile mijlocii	U 65	U 120	I 180		I 120	L 60	L 100	194	
	24	25	28		40	54	23		
Laminor profile ușoare	L 50		T 30		T 50	20	50	178	
	32		26		31	33 56			
Laminor de sârmă	Ø 6 mm					Ø 12 mm		58	
	29					29			
n = 500 / 14(nr. de poziții) = 35, 714 rot / min							Total	500	

Din tabelul 5.4 se observă că a rezultat turația $n = 35,7 \text{ rot/min}$, turație la care se vor efectua determinările experimentale din acest capitol.

5.6.1 Înregistrarea parametrilor experimentali la fiecare regim de solicitare

În timpul experimentărilor au fost înregistrate variațiile ciclice de temperatură de la suprafața și din secțiunea radială a probelor experimentale. Rezultatele obținute au fost transpuse sub formă de diagrame pentru fiecare marcă de oțel, respectiv fontă analizate. În diagramele din fig.5.8 - 5.10 se prezintă graficele de variație a temperaturilor pentru marca de oțel OTA 3 în toate cele trei regimuri de solicitare, [112]. Diagrame similare au fost trasate pentru fiecare dintre mărcile de oțeluri și fonte studiate, [112,114-117,123].

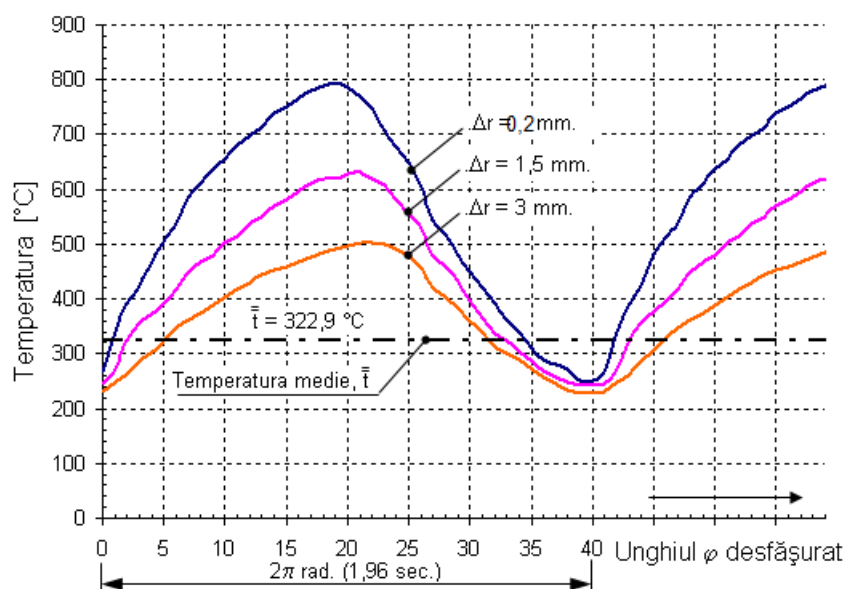


Fig.5.8 Diagrama variațiilor de temperatură pe suprafața și în stratul superficial al probelor experimentale, solicitate după regimul A de funcționare, cu $n = 35,7 \text{ rot/min}$

Analizând diagramele variațiilor de temperaturi de pe parcursul experimentărilor (după regimurile de solicitare A, B și C) se constată că cea mai ridicată temperatură pentru suprafața exterioară, când $\Delta r = 0,2 \text{ mm}$, a fost de $800,7^\circ \text{C}$ în regimul A de solicitare fig.5.8. Această situație este normală deoarece răcirea s-a făcut în aer liber. Valorile minime ale temperaturilor pentru cele trei curbe se situează peste $234,7^\circ \text{C}$, [112].

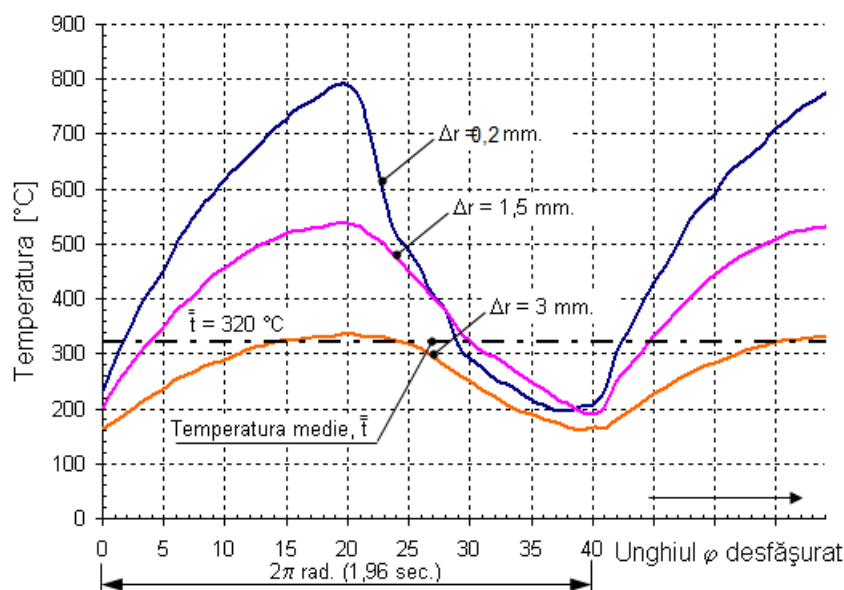


Fig.5.9 Diagrama variațiilor de temperatură pe suprafață și în stratul superficial al probelor experimentale, solicitate după regimul B de funcționare, cu $n = 35,7$ rot/min

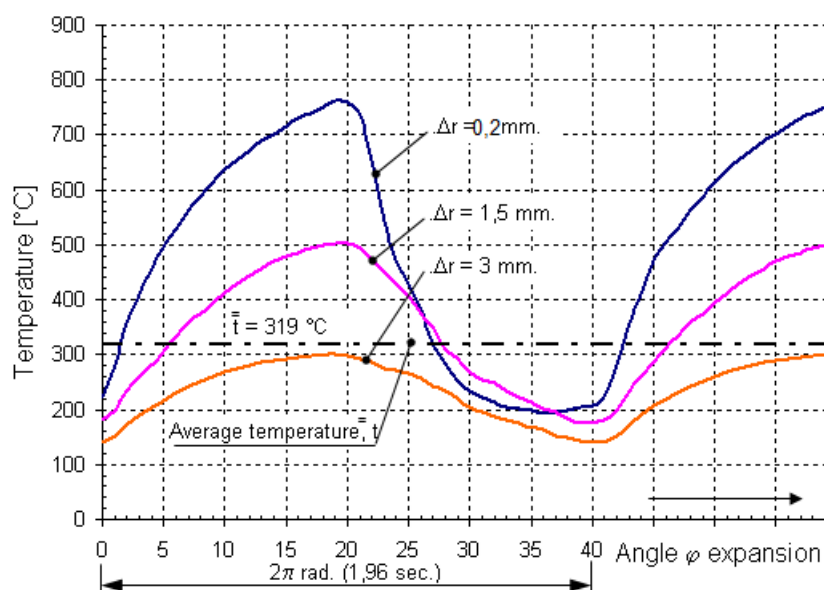


Fig.5.10 Diagrama variațiilor de temperatură pe suprafață și în stratul superficial al probelor experimentale, solicitate după regimul C de funcționare, cu $n = 35,7$ rot/min

În cazul regimului B de solicitare, cu răcirea probelor în baie de apă circulantă, curbele de variație a temperaturii, conform fig.5.9, au o pantă puțin mai accentuată în zona unghiului de răcire, având temperatura maximă înregistrată pe suprafața probelor de $796,4^{\circ}\text{C}$, iar temperaturile minime din stratul superficial s-au aflat între limitele $168,1^{\circ}\text{C}$... $215,2^{\circ}\text{C}$, [112,123].

În regimul C de solicitare, în care răcirea s-a efectuat cu zăpada carbonică insuflată prin stingătoare de incendiu, printr-un colector – distribuitor, curbele de variație ale temperaturii sunt mult mai accentuate, înregistrându-se o temperatură maximă de $766,3^{\circ}\text{C}$, iar în stratul superficial temperatura minimă a fost $138,8^{\circ}\text{C}$, fig.5.10, [112,123].

Nivele maxime, respectiv minime ale variațiilor de temperaturi aferente probelor realizate din marca de oțel OTA3, supuse experimentărilor în cele trei regimuri de solicitare A, B, C se prezintă în tabelul 5.5.

Tabelul 5.5

Nivelele maxime și minime ale variațiilor de temperatură pentru oțelul OTA3

Adâncimea în stratul superficial al inelelor Δr [mm]	Diagrama variațiilor de temperatură în regimul de solicitare A (fig.5.8)		Diagrama variațiilor de temperatură în regimul de solicitare B (fig.5.9)		Diagrama variațiilor de temperatură în regimul de solicitare C (fig.5.10)	
	Variațiile de temperaturi [°C]					
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
0,2	800,7	265,2	796,4	203,1	766,3	197,1
1,5	639,5	250,4	543,7	193,6	504,6	175,3
3,0	508,1	233,5	338,3	162,7	298,4	138,8
Nr. de rotații $n = 35,7$ rot/min $\phi_i = \phi_e = 180^0 = \pi$ rad						

În toate regimurile de solicitare, cele mai mari variații de temperaturi s-au înregistrat la suprafața probelor experimentale și scad spre interiorul acestora.

5.6.2 Urmărirea apariției primelor fisuri specifice fenomenului de oboseală termică

În timpul experimentărilor după regimurile de exploatare A, B și C aplicate separat pe câte un lot de probe, realizat din cele șase mărci de oțeluri și fonte studiate, s-a urmărit apariția primelor fisuri de oboseală termică. Acestea au început să apară pe muchiile ascuțite exterioare, laterale, corespunzătoare diametrului maxim de 250 mm al probelor, după un anumit număr de cicluri de solicitare termică. Vizualizările pentru constatarea apariției fisurilor specifice fenomenului de oboseală termică s-au efectuat de câte două ori pe zi experimentală, calculându-se numărul de cicluri de solicitare efectuate la fiecare vizualizare. Astfel, s-au întocmit histogramme de durabilitate, separat pentru fiecare din cele trei regimuri de solicitare și, în cadrul acestora, pentru fiecare marcă de material studiat, iar rezultatele se prezintă în fig.5.11-5.13, [107,109,112,114-117,123].

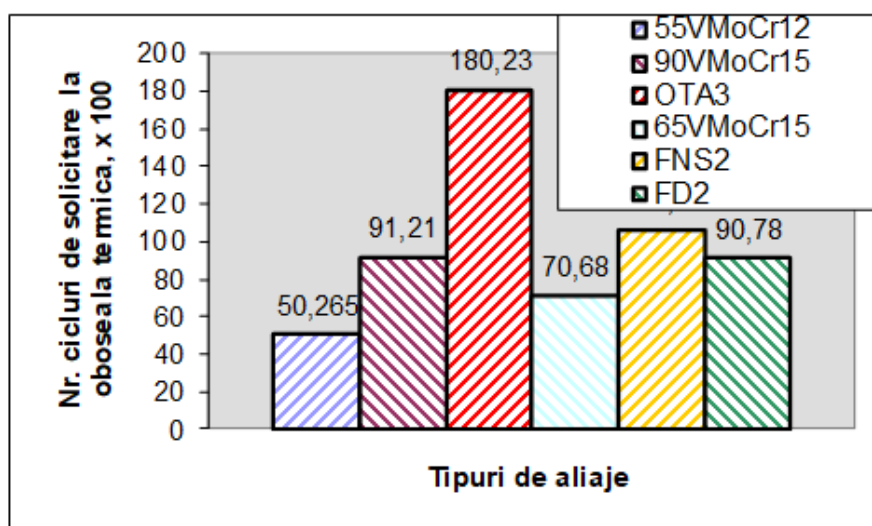


Fig.5.11 Histograma durabilităților de exploatare experimentală la oboseală termică a oțelurilor și fontelor cercetate, după regimul A de solicitare

În regimul A de solicitare, fig.5.11, în care răcirea s-a efectuat în aer liber, materialele studiate au rezistat cel mai mult la ciclurile de încărcare, până la apariția primelor fisuri de oboseală termică, acesta fiind considerat un *regim ușor de încărcare termică*.

În regimul B de solicitare, fig.5.12, răcirea probelor s-a făcut efectuat cu apă, iar fisurile de oboseală termică au apărut la un număr mai mic de cicluri de încărcare, acesta fiind apreciat ca fiind un *regim de solicitare medie*.

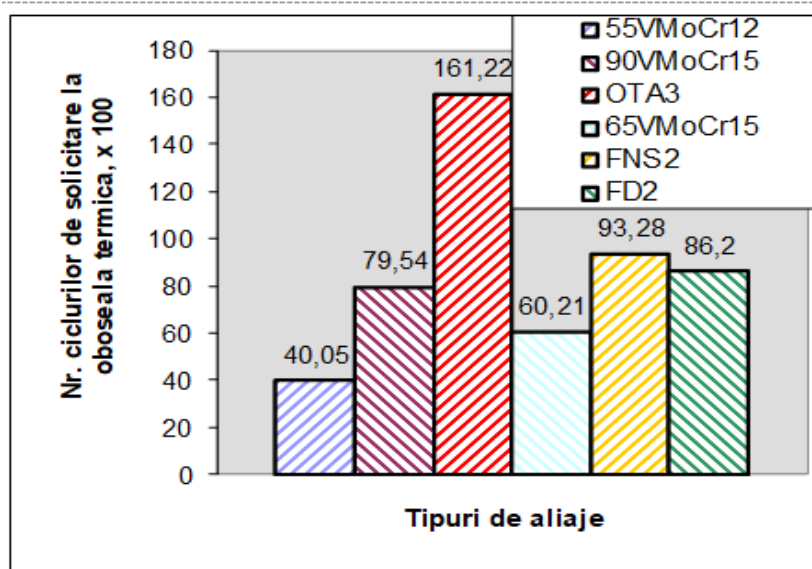


Fig.5.12 Histograma durabilităților de exploatare experimentală la oboseală termică a oțelurilor și fontelor cercetate, după regimul B de solicitare

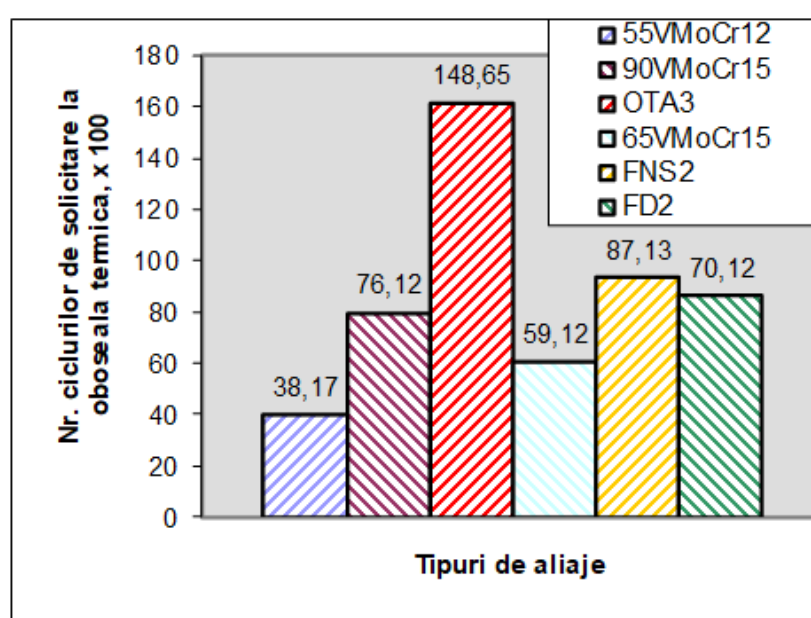


Fig.5.13 Histograma durabilităților de exploatare experimentală la oboseală termică a oțelurilor și fontelor cercetate, după regimul C de solicitare

În cazul regimului C de solicitare, fig.5.13, la care pentru răcirea probelor s-a utilizat zăpadă carbonică, fisurile de oboseală termică au apărut la cel mai mic număr de cicluri de încărcare, acesta fiind considerat un *regim greu de solicitare*, [107,109,112, 14-117,123].

Cele mai bune rezultate de stabilitate la oboseală termică le prezintă oțelul turnat de tip adomit – OTA 3 la care au apărut primele fisuri specifice după 18023 cicluri de încărcare în regimul A, respectiv 14865 în regimul C de solicitare termică. Acest oțel are în compoziția chimică carbonul spre limita superioară și un conținut apreciabil de Cr și Ni. Celelalte mărci de oțeluri forjate 55VMoCr12, 90VMoCr5 și 65VMoCr15 au suportat relativ bine solicitările la oboseală termică în regimul A de solicitare și acceptabil la solicitările din regimurile B și C, [107,109,112, 14-117,123].

Probele executate din cele două mărci de fonte FNS2 și FD2 au suportat relativ bine solicitările la oboseală termică și se folosesc pentru realizarea cilindrilor semiduri și duri din cajele semifinisoare și finisoare unde forțele de laminare sunt relativ mici, [46,107,109,112,114].

5.7 Evaluarea rezultatelor obținute în laborator, comparativ cu cele industriale

În scopul evaluării rezultatelor cercetărilor asupra rezistenței la oboseală termică a probelor experimentale și extinderea rezultatelor comparativ cu durabilitățile de exploatare a cilindrilor din laminoarele industriale este necesar ca variațiile câmpurilor de temperatură atât în timpul laminărilor experimentale, cât și din experimentările de durabilitate a probelor inele să fie calculate și în formă adimensională, respectiv în variații de temperatură specifică – adimensională, care se determină cu relația (2.6), din capitolul 2. Concomitent cu introducerea noțiunii de temperatură specifică este necesar să se introducă și noțiunea de rază specifică, adimensională, după relația, [107,109,112,114]:

$$\rho = \frac{r}{R} \quad (5.1)$$

În care: ρ – raza adimensională din secțiunea radială a cilindrului, care variază între 0 și 1;

r - rază oarecare măsurată în secțiunea radială a cilindrului;

R – raza maximă a cilindrului în secțiunea radială.

Pentru $r = 0$, $\rho = 0$ și dacă $r = R$, $\rho = 1$.

Valorile medii ale variațiilor de temperatură “ $\bar{\theta}$ ” se determină aplicând relația lui Simpson (2.1), prezentată în capitolul 2.

Utilizarea variațiilor de temperaturi specifice și a razelor specifice în formă adimensională este impusă datorită faptului că variațiile de temperaturi din cilindri de laminare industriali sunt mai mici față de variațiile termice din probele experimentale cercetate în laborator care, în mod intenționat, au fost ridicate pentru a reduce timpul de experimentare până la apariția primelor fisuri de oboseală termică. Astfel, pentru determinarea numărului real de cicluri de solicitare a probelor inele se impune calcularea coeficientului de influență termică K_T , determinat cu relația, [103,106,-109,112-117]:

$$K_T = \frac{\bar{\theta}_{\text{experimentare probe inele}}}{\bar{\theta}_{\text{laminare experimentală}}} \quad (5.2)$$

În care: $\bar{\theta}_{\text{laminare experimentală}}$ - temperatura specifică medie a mediilor celor trei nivele de variație ale temperaturii ($\Delta r = 0,2; 1,5; 3$) din diagrama laminării experimentale cu $n = 35,7$ rot/min;

$\bar{\theta}_{\text{experimentare probe inele}}$ - temperatura specifică medie a mediilor variațiilor de temperatură din diagramele experimentale ale probelor inele cu $n = 35,7$ rot/min (fig.5.8-5.10).

În capitolul 3, tabelul 3.5 s-a prezentat sinteza rezultatelor obținute pentru câmpurile de temperaturi înregistrate la laminarea experimentală cu $n = 35,7$ rot/min, tabel în care s-a calculat temperatura specifică medie „ $\bar{\theta}$ ” pe baza relațiilor existente în literatura de specialitate și prezentate în capitolul 2.

Prin calcule similare s-a determinat temperatura specifică $\bar{\theta}$, respectiv medie a mediilor $\bar{\theta}$, după prelucrarea diagramelor din fig. 5.8-5.10, corespunzătoare regimurilor de experimentare A, B și C, cu $n = 35,7$ rot/min. Rezultatele acestor calcule se prezintă în tabelul 5.6, unde se calculează și valorile coeficientului de influență termică K_T , [112].

În tabelul 5.7 se prezintă numărul real de cicluri de solicitare la oboseală termică a probelor executate din oțelurile și fontele utilizate pentru realizarea cilindrilor de laminare, calculate cu ajutorul coeficientului de influență termică, [112].

Pentru aprecierea durabilității probelor-inele exprimate în cicluri de încărcare până la apariția primelor fisuri de oboseală termică s-au studiat durabilitățile de exploatare a cilindrilor din laminoarele industriale, pentru fiecare din mărcile de oțeluri și fonte analizate.

Durabilitățile medii din exploatarea industrială, comparativ cu durabilitățile medii reale, obținute pe probele experimentale se prezintă în tabelul 5.8.

Tabelul 5.6

Calculul coeficientului de influență termică K_T pentru nivelele ciclurilor variațiilor de temperatură specifică la regimurile de solicitare A, B, C

Temperatura specifică medie a mediilor calculată la laminarea experimentală $\bar{\theta}_{la\ min\ are} = 0,263453$		
Valorile variațiilor de temperatura specifică, medii a mediilor $\bar{\theta}$, calculate pentru regimurile de solicitare la oboseală termică A, B, C		
Regimul A	Regimul B	Regimul C
$\bar{\theta}_A = 0,556759$	$\bar{\theta}_B = 0,529776$	$\bar{\theta}_C = 0,511069$
Coeficienții de influență termică		
$K_{TA} = \frac{0,556759}{0,263453} = 2,11331$	$K_{TB} = \frac{0,529776}{0,263453} = 2,01089$	$K_{TC} = \frac{0,511069}{0,263453} = 1,93988$

Tabelul 5.7

Numărul real al ciclurilor de solicitare la oboseala termică în regimurile A, B, C, a probelor executate din mărcile de oțeluri și fonte utilizate pentru confecționarea cilindrilor de laminare, calculate cu ajutorul coeficientului de influență termică K_T

Nr. crt.	Marca de oțel sau fontă utilizată pentru confecționarea cilindrilor de laminare la cald	Numărul real de cicluri de încărcare termică echivalentă cilindrilor de laminare, executați din oțelurile și fontele studiate		
		Regimul A	Regimul B	Regimul C
		Valorile coeficientului de influență termică		
		$K_{TA} = 2,11331$	$K_{TB} = 2,01089$	$K_{TC} = 1,93988$
1	55VMoCr12	10622,5	8053,6	7404,5
2	90VMoCr15	19275,5	15994,6	14766,3
3	OTA3	38088,1	32419,5	28836,3
4	65VMoCr15	14936,8	12107,5	11468,5
5	FNS2	22451,8	18757,5	16902,1
6	FD2	19184,6	17333,8	13602,4

Din tabelul 5.8 se observă că pentru mărcile de oțeluri cercetate 55VMoCr12, 90VMoCr15 și OTA3, valorile durabilităților obținute în faza industrială sunt mai mici decât valorile obținute ca urmare a cercetărilor efectuate în laborator. Aceasta se datorează influenței efectelor mecanice din timpul procesului de laminare industrială, cum ar fi frecările din calibre. Pentru oțelul 65VMoCr15 nu s-a studiat durabilitatea industrială deoarece această marcă de oțel este utilizată pentru fabricarea cilindrilor de laminare din laminorul de semifabricate care, în momentul efectuării cercetărilor a fost dezafectat și trecut în conservare, [92,97,112,114].

Tabel 5.8

Durabilitățile medii exprimate în cicluri de solicitare termică pentru cilindrii din laminoarele industriale și a probelor experimentale, executate din mărcile de oțeluri și fonte utilizate pentru confecționarea cilindrilor de laminare la cald

Nr. crt.	Marca de oțel sau fontă utilizată pentru confecționarea cilindrilor de laminare la cald	Numărul mediu de cicluri de solicitare la oboseală termică, a cilindrilor de laminare la cald și a probelor experimentale	
		Media numărului de cicluri determinate pe probele experimentale exploatate după regimurile A, B și C	Media numărului de cicluri de încărcare termică la laminoarele industriale de profile grele, mijlocii și ușoare
1	55VMoCr12	8693,5	6120,61
2	90VMoCr15	16678,8	10881,02
3	OTA 3	33114,6	22428,15
4	FNS 2	19370,4	4721,85
5	FD 2	16706,93	25654,51

Cilindrii realizați din fonta FNS 2 au în exploatarea industrială, durabilitatea medie de aproximativ 4 ori mai mică față de durabilitatea medie obținută experimental în laborator. În această situație a fost necesar să analizăm calitatea cilindrilor industriali executați din această marcă de fontă. Astfel, s-a constatat că majoritatea cilindrilor au avut defecte de fabricație, printre care porozități excesive și structuri necorespunzătoare. În acest sens, trebuie remarcat faptul că porozitățile influențează în mod negativ durabilitatea cilindrilor în laminarea industrială, [112,116,139].

Fonta dură FD 2, utilizată la confecționarea cilindrilor de laminare din cazele trenului intermediar și finisor din cadrul laminorului de profile mici, în fază de exploatare industrială au dat rezultate foarte bune, asigurând o durabilitate medie de 1,5 ori mai mare decât cea obținută pe probele inele experimentale. Această diferență de durabilitate medie se explică prin faptul că în regimurile A, B și C turația probelor a fost 35,7 rot/min, iar cilindrii industriali de laminare din cazele intermediare și finisoare ale laminorului de profile mici au turația de 266-575 rot/min, fapt ce corespunde unui coeficient de viteză $K_v = 6,33-16,106$ care mărește numărul ciclurilor de solicitare la oboseală termică până la apariția primelor fisuri specifice. În această situație putem concluziona că, la viteze relativ mici de rotație a cilindrilor de laminare, variațiile de temperatură sunt mai mari, iar fenomenul de oboseală termică este mai accentuat. La viteze mari de laminare, unde numărul de rotații este mai însemnat, în cazul nostru se ajunge la 266-575 rot/min, variațiile de temperatură sunt mai mici, iar oboseala termică se atenuează și astfel crește numărul de cicluri de solicitare termică, până la apariția primelor fisuri specifice acestui fenomen, [112,116].

5.8 Propuneri de materiale pentru fabricarea cilindrilor de laminare la cald

Având în vedere comportarea mediocră în exploatare a oțelurilor forjate 55VMoCr12 și 90VMoCr15 s-au propus două materiale care au fost supuse experimentărilor de laborator pentru determinarea rezistenței la oboseală termică și anume:

- 150MoNiCr15 și 250TiW3Cr24, [112].

Marca 150MoNiCr15 este un oțel hipereutectoid turnat care prezintă o stabilitate mai mare la oboseală termică și rezistență excepțională la uzură. Cilindrii de laminare realizați din această oțel pot fi executați după o tehnologie de turnare în cochile metalice, operația de forjare fiind exclusă. Tratamentul termic recomandat este recoacerea efectuată la temperatura de $820^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ urmat de normalizare. Microstructura acestui oțel după tratamentul termic de normalizare este de sorbită perlitică cu rețea dispersată, descompusă din cementită coagulată. Durabilitatea de exploatare a acestor cilindri executați din oțelul propus este mai mare de 2,5...3 ori decât a cilindrilor executați în prezent din oțelurile forjate, [112].

Aliajul 250TiW3Cr24 are conținutul de carbon și de crom ridicat, ceea ce asigură o stabilitate a austenitei în intervalul temperaturii de transformare perlitică, [112].

Cercetările de determinare a rezistenței la oboseală termică pe probe executate din oțelul 150MoNiCr12 și aliajul 250TiW3Cr24 au fost efectuate pe aceeași instalație concepută pentru efectuarea încercărilor de durabilitate la cicluri de încărcare termică. Pentru aceasta au fost realizate câte două probe sub formă de inele din fiecare material propus, acestea fiind prezentate în fig.5.14, [112,115].



Fig.5.14 Probele inele confecționate pentru încercări de durabilitate la oboseală termică a oțelului 150MoNiCr12 și a aliajului 250Ti W3Cr24

Compoziția chimică și unele proprietăți mecanice ale probelor inele executate din oțel marca 150 MoNiCr12 se prezintă în tabelul 5.9, iar ale celor confecționate din aliajul 250 TiW3Cr24 se prezintă în tabelul 5.10. Probele inele au fost executate prin turnare și au fost supuse unui tratament termic de recoacere după care au fost prelucrate mecanic, fiind ulterior tratate termic prin normalizare. Probele astfel obținute au fost montate în instalația de determinare a rezistenței la oboseală termică și solicitate după regimul termic B, acesta fiind considerat un regim mediu de solicitare. Numărul de rotații al probelor a fost $n = 35,7 \text{ rot/min}$, iar temperatura mediului cuptorului a fost de $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, [112,115].

Tabelul 5.9

Compoziția chimică și proprietățile mecanice ale probelor inele executate din oțel hipereutectoid 150 MoNiCr12, după buletine de analiză și probe mecanice

Nr. probă	Compoziție chimică [%]							
1;2	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
	1,46	0,47	0,75	0,026	0,05	1,20	1,13	0,13
	Proprietăți mecanice							
	Tensiunea la rupere [N/mm ²]		Tensiunea la curgere [N/mm ²]		Reziliența K [daN m/cm ²]		Duritatea HS (Shore)	
	L	T	L	T	L		45	
	1263	1120	970	930	1,12			

Tabelul 5.10

Compoziția chimică și proprietățile mecanice ale probelor inele pentru aliajul 250 TiW3 Cr 24, după buletine de analiză și probe de duritate

Nr. probă	Compoziție chimică [%]							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	W	Ti
1;2	2,44	0,3	0,36	0,12	0,14	26,4	3,4	0,09
	Duritatea suprafeței HS = 64							

În tabelul 5.11 se prezintă unele elemente ale regimului termic la care au fost supuse probele inele realizate din cele două materiale propuse analizei, [112,115].

Tabelul 5.11

Elementele regimului termic pentru solicitarea la oboseală termică a probelor inele executate din oțelul 150 MoNiCr12 și aliajul 250 TiW3Cr24 după regimul B de încărcare termică

Regimul de experimentare	Numărul de rotații a inelelor [rot/min]	Temperatura mediului cuptorului [°C]	Mediul de răcire
B	35,7	900 ± 10	Apă

În timpul experimentărilor s-a urmărit apariția primelor fisuri specifice fenomenului de oboseală termică pe muchiile laterale ale probelor inele. Rezultatele cercetărilor se prezintă sub formă de histogramme de durabilitate. În fig.5.15 se prezintă rezultatele obținute pentru oțelul 150MoNiCr12, comparativ cu cu mărcile de oțeluri forjate 55VMoCr12, 90VMoCr15 și 65VMoCr15. În fig.5.16 se prezintă rezultatele obținute pentru aliajul 250TiW3Cr24 comparativ cu fontele FNS2 și FD 2, [112,115].

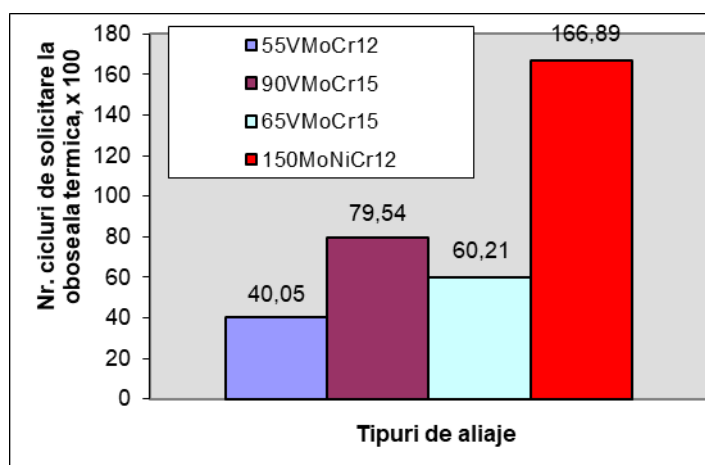


Fig.5.15 Histograma durabilității de exploatare experimentală în regimul B, la încărcări de oboseală termică a probelor inele, executate din oțel turnat 150MoNiCr12 în comparație cu oțelurile forjate, utilizate la confecționarea cilindrilor de laminare

Din fig.5.15 se observă că marca de oțel 150MoNiCr12 are o rezistență mult mai bună decât celelalte trei mărci de oțeluri utilizate la fabricarea cilindrilor de laminare, [112,115].

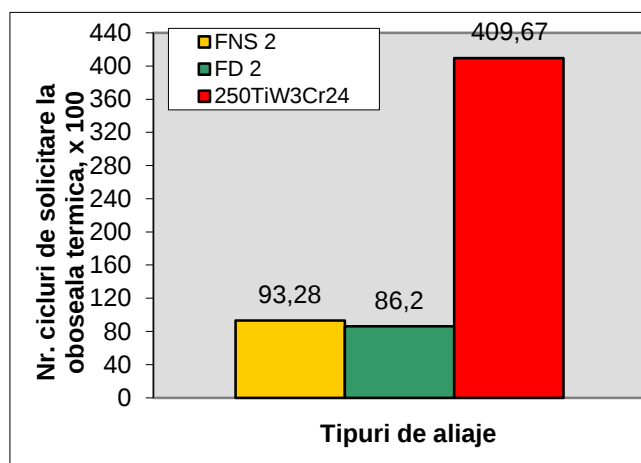


Fig.5.16 Histograma durabilității de exploatare experimentală în regimul B, la încărcări de oboseală termică a probelor inele, executate din aliajul 250TiW3Cr24 în comparație cu fontele utilizate la confecționarea cilindrilor de laminare

Din fig.5.16 se observă că aliajul 250TiW3Cr24 are o rezistență mult mai bună la oboseală termică decât fontele FNS2 și FD2. Utilizarea acestui aliaj la realizarea cilindrilor de laminare la cald duce la o creștere substanțială a durabilității de exploatare a cilindrilor de laminare, durabilitate ce depășește 4 până la 5,5 ori durata de exploatare a cilindrilor utilizați în prezent.

5.9 Parametrii șocului termic

Șocurile termice din cilindri de laminare se produc de obicei la începutul campaniilor de laminare, atunci când nu sunt respectate anumite condiții impuse pentru exploatarea rațională a cajelor, în special atunci când cilindrii din cajele degrositoare nu sunt încălziți inițial, iar temperatura mediului înconjurător din halele de producție în anotimpurile reci sunt scăzute, [112,123,132].

În timpul funcționării liniei de laminare, șocul termic în cilindri se produce într-o stare legată de schimbarea aproape instantanee a temperaturii acestuia, funcție de sursa de căldură introdusă în cilindru prin focarul de deformare și de blocajul transferului de temperatură în zona interioară a cordonului calibrului spre mediul înconjurător. Astfel, șocurile termice constituie o particularitate de acțiune a tensiunilor termice, produse în cilindri de laminare la cald. Aceste tensiuni ajung la valori

excesiv de mari în zona diametrelor maxime ale cilindrilor, respectiv în zona cordoanelor calibrelor, tensiuni ce depășesc cu mult tensiunea de rupere a materialelor – oțeluri și fonte – din care sunt realizați cilindri, producându-se forfecarea cordoanelor acestora, [112,123,132].

Pentru a determina parametrii șocului termic, porțiunile din secțiunea cilindrului de laminare din dreptul cordoanelor calibrelor pot fi asimilate cu plăci plane de formă circulară având dimensiuni determinate, [53].

Relația de aproximare a temperaturii care conduce la apariția șocului termic în plăci plane este [53,112,132]:

$$T_0 = \frac{\lambda \cdot \sigma_R}{E \cdot \alpha} \cdot \frac{3,25 \cdot (1 - \mu)}{a \cdot \alpha_T} \quad (5.3)$$

În care: σ_R - tensiunea de rupere a materialului din care este realizat cilindrul de laminare;

E - modul de elasticitate longitudinal;

α - coeficient de dilatare liniară;

μ - coeficient de contracție transversală;

λ - coeficient de conductivitate termică;

α_T - coeficient de difuzivitate termică;

a - jumătate din grosimea plăcii, respectiv jumătate din grosimea cordonului calibrului cilindrului de laminare.

Parametrul șocului termic dependent de caracteristicile materialului, [53,112,132]:

$$\frac{\lambda \cdot \sigma_R}{E \cdot \alpha} - \text{parametrul șocului termic} \quad (5.4)$$

Temperatura maximă pentru criteriul materialelor este [53,112,132]:

$$T_{0\max} = \frac{\sigma_R}{E \cdot \alpha} \cdot (1 - \mu) \quad (5.5)$$

$$\sigma_R = \frac{E \cdot \alpha \cdot T_0}{1 - \mu} \quad (5.6)$$

Valorile parametrilor șocului termic, pentru materialele analizate se prezintă în tabelul 5.12.

Tabelul 5.12

Valorile parametrului șocului termic și al criteriului materialelor pentru oțelurile și fontele analizate

$E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ daN/mm}^2$; $\alpha = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}$; $\mu = 0,3$; $\lambda = (45,4 \dots 58,62) \cdot 10^3 \text{ mm}^0\text{K}$			
Mărcile de oțeluri și fonte utilizate la confecționarea cilindrilor	σ_R [N/mm ²]	Parametrului șocului termic $\frac{\lambda \cdot \sigma_R}{E \cdot \alpha}$	Criteriul materialelor pentru șocul termic $\frac{\sigma_R}{E \cdot \alpha}$
55 VMoCr12 90VMoCr15 65VMoCr15	Media 830	$150,7 \cdot 10^5$	$3,32 \cdot 10^2$
OTA 3	720	$129,6 \cdot 10^5$	$2,88 \cdot 10^2$
FNS 2	600	$108,04 \cdot 10^5$	$2,40 \cdot 10^2$
FD 2	700	$126,05 \cdot 10^5$	$2,80 \cdot 10^2$

Temperatura de producere a șocului termic este direct proporțională cu parametrul șocului termic și cu criteriul materialului, dar trebuie avut în vedere faptul că tensiunile termice de solicitare acționează ciclic la fiecare rotație a cilindrilor de laminare, cu durate relativ mici, de ordinul secundelor. Din acest motiv, tensiunile de solicitare trebuie să depășească de 4-5 ori tensiunea de rupere a materialului pentru a se produce distrugerea cilindrilor prin forfecarea cordonului alăturat calibrului cilindrului de laminare la cald.

Cea mai bună comportare la acțiunea șocului termic o are fonta FNS 2, pentru care parametrul șocului termic are cea mai mică valoare, respectiv $108,04 \cdot 10^5$. Mărcile de oțel aliate cu V, Cr și Mo sunt cele mai expuse la producerea șocului termic, având valoarea cea mai mare a parametrului șocului termic de $150,7 \cdot 10^5$ [112,132]:

Șocul termic este iminent la viteze de încălzire foarte mari, iar factorul determinant în producerea acestuia nu este timpul, ci frecvența de producere a solicitărilor.

5.10 Concluzii

Efectuarea experimentarilor pentru determinarea rezistenței la oboseală termică pentru diferite materiale, oțeluri și fonte, destinate realizării cilindrilor de laminare s-au realizat pe loturi de probe, în serii distincte. Pentru materialele studiate s-au analizat caracteristicile de material, sub aspectul compoziției chimice și a proprietăților mecanice, iar apoi s-a urmărit comportarea fiecărui material în trei regimuri termice de solicitare:

- în regimul A de solicitare, în care răcirea s-a efectuat în aer liber, materialele studiate au rezistat cel mai mult la ciclurile de încărcare, până la apariția primelor fisuri de oboseală termică, acesta fiind considerat un regim ușor de solicitare;
- în regimul B de solicitare, răcirea s-a realizat prin imersia stratului superficial al inelelor în apă, iar fisurile de oboseală au apărut la un număr mai mic de cicluri de încărcare, acesta fiind considerat ca un regim de solicitare mediu;
- în regimul C de solicitare, când pentru răcire s-a utilizat zăpadă carbonică, fisurile de oboseală au apărut la cel mai mic număr de cicluri de încărcare, acesta fiind considerat un regim greu de solicitare;
- oțelul care a dat cele mai bune rezultate în ceea ce privește rezistența la oboseală termică, studiată în regimul C de solicitare a fost oțelul hipereutectoid de tip Adamit – OTA 3, la care au apărut primele fisuri de oboseală termică după 18023 cicluri de solicitare;
- mărcile de oțeluri 55VMoCr12, 90VMoCr12 și 65VMoCr15, utilizate la fabricarea cilindrilor de laminare prin forjare din lingou turnat, au suportat relativ bine solicitările la oboseală termică, încărcate în regimul A de solicitare și s-au comportat acceptabil la solicitările din regimurile B și C de solicitare;
- dintre cele două mărci de fonte utilizate în cercetarea experimentală efectuată, o comportare mai bună a avut fonta FNS 2, aceasta fiind utilizată la realizarea cilindrilor semiduri cu grafit nodular, turnați în forme combinate, prin procedee simplex sau duplex;
- durabilitatea în exploatare a cilindrilor realizați din FNS2 se explică prin aceea că fisurile de oboseală înaintază foarte greu, deoarece se opresc în nodulii de grafit care reprezintă adevărate obstacole în fața dezvoltării acestor fisuri;
- fonta dură FD 2 se comportă satisfăcător la solicitările de oboseală termică și se folosește pentru realizarea cilindrilor duri, care de obicei se folosesc în cajele finisoare;
- pentru mărcile de oțeluri cercetate 55VMoCr12, 90VMoCr15 și OTA3, valorile durabilităților din faza industrială sunt mai mici decât decât valorile obținute ca urmare a cercetărilor efectuate în laborator și se datorează influenței frecărilor din calibre din timpul procesului de laminare industrială;
- cilindrii fabricați din fonta FNS 2 au în exploatarea industrială, durabilitatea medie de aproximativ 4 ori mai mică față de durabilitatea medie obținută experimental pe probele solicitate la oboseală termică, aceasta datorându-se porozității excesive și a structurilor necorespunzătoare;
- fonta dură FD 2 a dat rezultate foarte bune, asigurând o durabilitate medie de 1,5 ori mai mare în fază de exploatare industrială decât durabilitatea obținută pe probele inele experimentale;
- la viteze mari de laminare, unde numărul de rotații este mare, variațiile de temperatură sunt mai mici, iar oboseala termică se atenuează;

- oțelul 150MoNiCr12 propus pentru realizarea cilindrilor de laminare la cald, comparativ cu cu mărcile de oțeluri forjate 55VMoCr12, 90VMoCr15 și 65VMoCr15 are o rezistență mai mare la oboseală termică;
- aliajul 250TiW3Cr24 are o rezistență mult mai bună la oboseală termică decât fontele FNS2 și FD2, ceea ce duce la o creștere substanțială a durabilității de exploatare a cilindrilor de laminare;
- factorul determinant în producerea șocului termic este frecvența de producere a solicitărilor;
- cea mai bună comportare la acțiunea șocului termic o are fonta FNS 2, iar cele mai expuse la producerea șocului termic sunt oțelurile aliate cu V, Cr și Mo.

Creșterea duratei de exploatare a cilindrilor de laminare prin înlăturarea avariilor produse prin ruperea accidentală a acestora ca urmare a atenuării efectelor oboselii termice, evitarea șocurilor termice și exploatarea rațională a acestora, sunt problemele la care am încercat să găsim răspunsuri prin cercetările efectuate. Cu toate acestea, exploatarea rațională a cilindrilor de laminare la cald sunt probleme de mare actualitate, care trebuie cercetate în continuare.

CAPITOLUL 6

EVALUAREA REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ TERMICĂ A ORGANELOR DE MAȘINI FIXE ȘI MOBILE DIN MOTOARELE CU ARDERE INTERNĂ

Ca urmare a înființării în cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara, în anul 2010 a specializării Autovehicule Rutiere, am considerat oportună extinderea experienței acumulate în cadrul oboselii termice a cilindrilor de laminare la cald și în domeniul organelor de mașini din componența autovehiculelor supuse acestui fenomen, cum ar fi: chiulase, pistoane, etc. În acest context, a fost concepută și realizată o instalație care să permită studiul rezistenței la oboseală termică a organelor de mașini din componența motoarelor cu ardere internă supuse acestui fenomen. Instalația are la bază conceptul instalației pentru studiul rezistenței la oboseală termică a cilindrilor de laminare la cald, dar care a presupus modificări constructive ale arborelui principal și al modului de fixare a probelor. Înaintea proiectării modificărilor aferente noii instalații s-au studiat principiile și metodele care stau la baza modelării oboselii termice în condiții de laborator. Studiul oboselii termice în condiții de laborator conduce la stabilirea limitelor de rezistență la oboseală termică pentru diferite organe de mașini supuse acestui fenomen, evitarea apariției fisurilor specifice prin optimizarea regimului termic al motorului și propunerea de noi materiale cu rezistență ridicată la oboseală termică. Proiectul acestei instalații a constituit documentația pe baza căreia subsemnata a obținut brevetul de invenție Nr.129699/30.03.2016 cu titlul “Instalație pentru studiul rezistenței la oboseală termică”.

6.1 Importanța studiului oboselii termice la motoarele cu ardere internă

Organele de mașini din componența motoarelor autovehiculelor participă la realizarea ciclului de lucru care este caracterizat prin variații de temperaturi. Aceste organe de mașini preiau o parte însemnată din căldura dezvoltată în camera de ardere și o transmit fluidului de răcire. Din această căldură, doar o mică parte se transmite fluidului de răcire în timpul schimbului de gazele, cealaltă parte rămânând încorporată în aceste organe de mașini. În funcție de cantitatea de căldură produsă la funcționarea motorului și de diferite rezistențe termice (conductivitatea termică a materialului, secțiunile de construcție ale pieselor, etc.), la nivelul acestor piese se formează câmpuri de temperaturi care generează apariția unor tensiuni termice ciclice. Dacă câmpul de temperaturi este staționar, acesta va produce tensiuni termice statice. În cazul variației în timp a acestuia pot exista două situații distincte, în funcție de viteza lui de variație. Astfel, la viteze mici de variație a câmpului de temperaturi, tensiunile termice sunt cvasistatice, iar la viteze mari iau naștere tensiuni termice variabile, [43,47,49,136,140,144,138]. Tensiunile termice depind de viteza și modul de transmitere al căldurii în piese, de forma acestora, conductivitatea termică a materialului și de intensitatea răcirii. Dacă peste aceste solicitări de natură termică se suprapun solicitări de natură mecanică, care sunt inerente în funcționarea motoarelor (presiunea internă sau externă a gazelor, greutatea proprie, sarcina provenită de la masa proprie a unui element asupra altuia) rezultă solicitări care au valori considerabile, [49,50,136,140,144,138].

Creșterea puterii volumice a motoarelor prin mărirea raportului de comprimare, a turației sau a supraalimentării au ca efect mărirea solicitărilor termomecanice, [41,145]. Deasemenea, în timpul funcționării motorului, datorită diferențelor de temperaturi pot apărea tensiuni termice instantanee care se suprapun peste tensiunile termice reziduale care apar ca urmare a solicitărilor termice anterioare, [42,44,48,145]. Ca urmare a mecanismului de formare a tensiunilor anterior descris, în diverse organe de mașini din interiorul motoarelor apar deformații. Dacă în urma acestor deformații se depășește limita de elasticitate a materialului piesei, pot să apară deformații plastice și, în zona respectivă a piesei, pot să apară fisuri de oboseală termică. Apariția acestor fisuri este favorizată și de efectul răcirii pieselor [41,42,44, 49,50,144,145]. Spre deosebire de oboseala termică, care apare după un

număr relativ mare de cicluri de solicitare și provoacă distrugerea prin apariția fisurilor specifice, la motoarele cu ardere internă poate apărea, mult mai frecvent, șocul termic. Acesta este mult mai periculos decât oboseala termică, deoarece poate provoca distrugerea pieselor după un număr relativ mic de cicluri de solicitare, [41,42,44, 49,50,53,136,144].

În timpul funcționării motoarelor cu ardere internă, pe suprafața și în stratul superficial al pieselor care participă la realizarea transferului de căldură, apar fisuri de oboseală termică care se dezvoltă treptat datorită variațiilor ciclice de temperatură. Fisurile de oboseală termică apar pe suprafața și în stratul superficial al acestor piese, chiar și în cele mai favorabile condiții de funcționare, limitând utilizarea organelor de mașini respective, situație care are efecte negative asupra indicilor energetici și economici ai motorului. Metodele clasice de calcul de rezistență a organelor de mașini din componența motoarelor cu ardere internă expuse fenomenului de oboseală termică nu țin cont de solicitările produse de variația câmpurilor de temperaturi, fenomene care se produc în funcționarea motorului, [41,44,49,52,136,144].

Pe de altă parte, în timpul realizării transferului de căldură, fluxurile termice nestaționare care apar în condiții de exploatare a motoarelor cu ardere internă, generează niveluri de temperaturi în organele de mașini care participă la realizarea regimului termic și, în aceste condiții, solicitarea mecanică se poate instala la temperaturi ridicate. În condițiile cele mai grele de solicitare, în zonele cu concentratori de tensiune, tensiunile mecanice pot depăși limita de curgere a materialului, [41,42,47,50]. În piesele cu concentratori de tensiune, caracterul ciclic al acțiunii simultane termice și mecanice, implică deformări elastoplastice ciclice.

Ruperea prin oboseală termică datorită exclusiv tensiunilor termice este foarte rar întâlnită. De cele mai multe ori deteriorarea organelor de mașini (materialelor) sub acțiunea solicitărilor termice constituie doar o primă sursă de inițiere a fisurilor, ruperea organului de mașină respectiv producându-se sub acțiunea tensiunilor mecanice. În literatura de specialitate formularea unor criterii de rezistență și metodele de calcul referitoare la oboseala termică care să fie universal valabile la fel ca și pentru oboseala mecanică nu există. Aceasta datorită diferențelor mari de caracteristici și restricții impuse materialelor din diferite domenii de activitate, iar pe de altă parte datorită aspectelor complicate ale solicitărilor în condiții de oboseală termică, [41,42,47,50].

Deși solicitarea organelor de mașini fixe și mobile din componența motoarelor cu ardere internă este un caz tipic de solicitare variabilă, calculele uzuale de rezistență pentru dimensionarea acestora, nu țin seama de tensiunile termice. Majoritatea metodelor de calcul nu sunt foarte precise și nu corespund la multe fenomene care se produc în funcționarea motorului. Principalele cauze care fac ca aceste metode să nu fie precise sunt: distribuția tensiunilor în material, existența tensiunilor, admiterea în calcul a ipotezelor simplificatoare. De asemenea, nu se cunoaște rezistența piesei la solicitări variabile când factorul hotărâtor este oboseala, caz în care rezistența depinde de mai mulți factori: starea suprafeței, calitatea prelucrării, configurația, dimensiunea pieselor, etc., ceea ce duce la imposibilitatea cunoașterii reale a forțelor care solicită aceste organe de mașini. Datorită acestor cauze, în calculul de rezistență nu se ține seama de influența variațiilor de temperaturi din stratul superficial, toate aceste cauze fiind compensate prin mărirea tensiunilor admisibile, ceea ce duce la supradimensionari ale acestor organe de mașini, [44,50,52,137].

Cunoașterea efectelor negative de distrugere a pieselor din componența motoarelor cu ardere internă, impune o cercetare amanunțită, teoretică și experimentală asupra fenomenului de oboseală termică. Cunoașterea rezistenței la oboseală termică a acestor organe de mașini permite determinarea duratei lor de exploatare, estimată prin număr de cicluri până la apariția primelor fisuri de oboseală termică.

6.2 Metode de evaluare a oboselii termice în condiții de laborator

Studiul literaturii de specialitate cu privire la principiile, criteriile și metodele de cercetare a oboselii termice a permis luarea unei decizii cu privire la modelarea în laborator a acestui fenomen, cu particularizare pentru organele de mașini din componența motoarelor cu ardere internă, [136,140,144].

În condiții de laborator, metodologia de experimentare trebuie să modeleze cu fidelitate starea de solicitare a organului de mașină supus fenomenului de oboseală termică. Datorită ipotezelor cu care

se lucrează în cercetările experimentare, studierea fenomenului se face pe modele care pot fi sub formă de epruvete, probe, eşantioane, etc. Astfel, studierea fenomenului se realizează folosind ipoteze simplificatoare, diferite de cele reale. Astfel, de o importanță deosebită în alegerea formei probelor o are geometria acestora. După stabilirea configurației probei urmează definirea modalităților de încălzire și răcire, luând în considerare influența factorilor geometrici și ai concentratorilor de tensiune, evitându-se coroziunea lor la suprafață și în stratul superficial, [42, 46,143-145].

Dependența rezistenței la oboseală termică pe durata unui ciclu termic este afectată de temperatura maximă pe ciclu, t_{max} , iar menținerea la acest nivel a temperaturi din interiorul cuptorului favorizează caracterul distrugerii materialului. Cu cât are loc o extindere a duratei de solicitare, cu atât apar mai multe fisuri care avansează, fie în stratul superficial, fie în masa materialului, producând distrugerea organului de mașină supus solicitărilor termice ciclice, [43,53,144].

În procesul modelării ciclurilor termice reale, probele folosite pot fi epruvete inelare, plate, cilindrice circulare, prismatice sau tubulare, respectiv discuri. Acestea pot fi încălzite prin diferite metode, respectiv prin curenți de înaltă frecvență (CIF), cu arzătoare de gaze, prin electrezistență, în curent de aer cald, prin imersare în metal topit și se răcesc în diferite medii (într-un curent de aer, în apă, în ulei, în emulsie de ulei sau săruri topite, zăpadă carbonică, etc.), [44,53,136,137].

Factorii care influențează nivelul tensiunilor termice depinde de, [43,53,137,138]:

- parametrul regimului termic;
- caracteristicile fizico-mecanice ale materialului și ritmul modificării acestora în stadiile oscilațiilor de temperatură;
- aspectul stării de tensiuni, geometria și parametrii constructivi ai elementului.

Pentru un element, distrugerea prin oboseală termică este dictată întotdeauna de tensiunile termice care au valori superioare celor mecanice, [42-44,53,142,144].

La evaluarea rezistenței la oboseală termică a materialelor, trebuie să se țină cont de următorii factori, [42-44,53,136,142]:

- numărul de cicluri de variație a temperaturii modelului până la apariția primelor fisuri de oboseală termică sesizabile cu ochiul liber pe suprafața probei;
- numărul de cicluri de variație a temperaturii modelului până la distrugerea acestuia;
- intensitatea fisurilor.

Metodele de încercare a materialelor supuse fenomenului de oboseală termică se împart în următoarele categorii, [42-44,53,144,145]:

- *încercări de stand*, care includ încercările realizate în condiții reale de funcționare, specifice exploatării și care permit fie evaluarea rezistenței la oboseală termică, fie disponibilitatea duratei de serviciu în condițiile solicitărilor termice ciclice;
- *încercări calitative*, care includ încercările realizate pe probe și epruvete, având forme cilindrice, plate, sub formă de țevă sau placă și care permit determinarea experimentală a numărului de cicluri termice până la apariția primelor fisuri specifice de oboseală termică pe suprafața probelor;
- *încercări cantitative*, care includ încercările pentru determinarea experimentală a numărului de cicluri termice de distrugere sau a durabilității termociclice și pot fi determinate prin măsurare nemijlocită sau pe cale analitică; metoda permite stabilirea dependenței numărului de cicluri de parametri ciclului, în funcție de care se poate face evaluarea cantitativă globală a durabilității diferitelor materiale supuse fenomenului de oboseală termică.

Oricare ar fi metodele de încercare/experimentare, cercetarea fenomenului de oboseală termică rezolvă două probleme, [42-44,136,144,145]:

- obținerea de date comparative privind rezistența la oboseală termică în cadrul unei grupe de materiale cu aplicabilitate la condițiile particulare de funcționare;
- obținerea și prelucrarea datelor experimentale care să permită și să asigure efectuarea prin calcul a evaluării cantitative a rezistenței la oboseală termică.

6.3 Prezentarea instalației experimentale

Obiectivul principal al realizării instalației experimentale constă în rezolvarea unor probleme fundamentale, complexe, din domeniul motoarelor cu ardere internă prin dobândirea de cunoștințe teoretice și experimentale cu privire la fenomenul de oboseală termică care apare în organele de mașini care participă la transferul de căldură din camera de ardere spre fluidul de răcire a motoarelor cu ardere internă, [142-145].

În urma studiului literaturii de specialitate s-au analizat principalele metode de modelare în condiții de laborator a fenomenului de oboseală termică, acestea fiind prezentate în subcapitolul 6.2. Instalația experimentală concepută și realizată se află în laboratorul de „Sisteme mecanice industriale” din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara, ansamblul instalației fiind prezentat în fig.6.1, [142-145].



Fig.6.1 Ansamblul instalației experimentale pentru determinarea rezistenței la oboseală termică a organelor de mașini din componența motoarelor autovehiculelor

Instalația este prevăzută cu un arbore central pe care s-au montat două discuri laterale și un disc intermediar. Între discul lateral stânga și cel intermediar, respectiv între acesta și discul lateral dreapta s-a montat câte o bucsă distanțieră care permite menținerea discurilor la o anumită distanță, în vederea montării probelor experimentale. Acestea se pot realiza din diferite organe de mașini scoase din uz din componența motoarelor cu ardere internă. Probele experimentale sunt montate cu ajutorul a două șuruburi între discurile laterale și cel intermediar. Un lot complet de probe experimentale cuprinde 24 buc., 12 montate între discul lateral stânga și cel intermediar, iar celelalte 12 sunt montate între discul intermediar și cel lateral dreapta. În două probe dispuse diametral opus se montează două termocuple conectate la un colector de termotensiune. Arborele central, astfel echipat, este legat la un motor electric care permite rotirea acestuia împreună cu probele, [142-145].

În partea superioară a instalației, deasupra zonei centrale a arborelui, acolo unde sunt fixate probele experimentale se află așezat un cuptor electric care permite încălzirea acestora în intervalul de temperaturi 20-1000°C. La partea inferioară a instalației probele sunt răcite în diverse medii de răcire alese în mod convenabil. Colectorul de termotensiune este conectat la un sistem de achiziție de date care permite înregistrarea variațiilor de temperaturi în probe pe toată durata experimentărilor. Instalația experimentală se sprijină pe o structură metalică de rezistență, realizată din profile U, [142-145].

În fig.6.2 se prezintă schema constructivă a instalației experimentale.

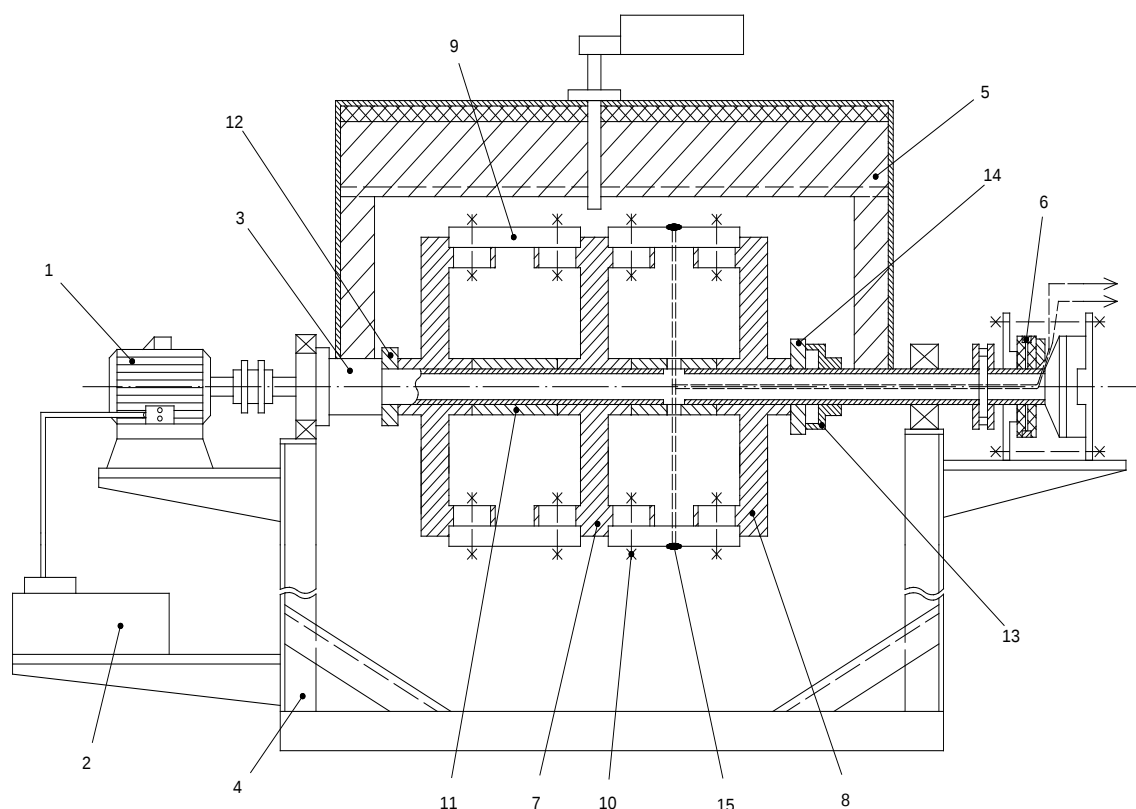


Fig. 6.2 Schema constructivă a instalației experimentale pentru determinarea rezistenței la oboseală termică a organelor de mașini din componența motoarelor cu ardere internă

În schema constructivă a instalației prezentată în fig.6.2 apar următoarele elemente componente: motorul electric 1, comandat de un convertor static de frecvență 2, antrenează axul principal 3, asamblat și așezat pe scheletul metalic 4. Pe axul principal se montează probele experimentale de formă dreptunghiulară. Peste probele experimentale s-a montat cuptorul 5, care produce încălzirea probelor într-o zonă sub formă de semicerc. La capătul axului principal, opus motorului de antrenare, este asamblat colectorul de termotensiune 6, care preia semnalele electromotoare de la termocuple, ale căror conductori sunt conectați la inelele colectoare. Probele 9 sunt montate pe discurile suport intermediare 7 și cele laterale 8, fiind fixate cu șuruburile 10, tangențial pe generatoarea discurilor. Distanțele necesare dintre discurile suport sunt funcție de lungimea probelor care, într-un set, trebuie să fie aproximativ egale și se stabilesc prin lungimea bușelor intermediare 11 și a bușei de capăt 12, care se pot deplasa pe axul principal pe o pană longitudinală. Rigidizarea sistemului se realizează cu ajutorul piuliței 13 și a șaibe de presiune 14, [142-145].

Probele supuse experimentărilor de oboseală termică pot să aibă în secțiune orice formă, chiar și secțiune cilindrică, cu lungimi diferite, dar pe seturi lungimile trebuie să fie aproximativ egale. Probele sunt găurite la ambele capete corespunzător cu canalele de montaj executate în discurile suport. În două probe așezate diametral opus pe discurile suport, se montează termocuplurile 15, având inerția de răspuns corespunzătoare ciclului de lucru al organelor de mașini din care s-au executat probele supuse regimurilor de oboseală termică.

Unul dintre principalele elemente componente ale instalației este arborele central, deoarece acesta este organul de mașină pe care se sprijină atât probele experimentale, cât și celelalte elemente care servesc la efectuarea experimentărilor. Deasemenea, arborele principal primește mișcarea de la motorul electric, realizând rotirea probelor și introducerea lor succesiv din cuptorul electric în mediul de răcire. În fig.6.3 se prezintă schema constructivă a axului principal al instalației experimentale pe care se montează probele necesare determinării rezistenței la oboseală termică. Arborele central este de secțiune tubulară pentru a putea permite trecerea firelor de conectare a termocuplelor la colectorul de termotensiune.

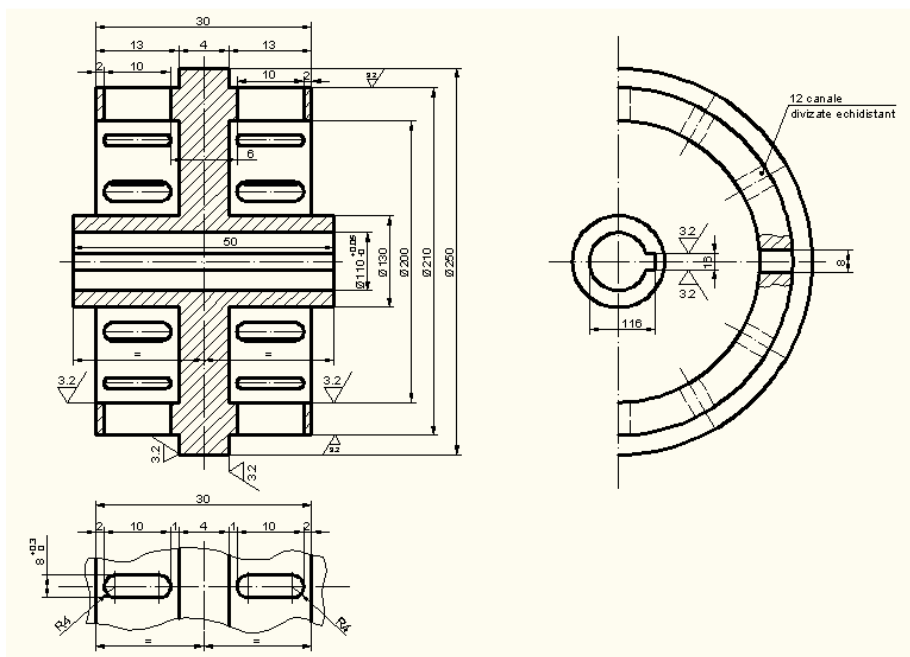


Fig.6.5 Schema constructivă a discului suport intermediare

În fig.6.6 se prezintă cele trei discuri pregătite în vedere asamblării în instalația experimentală, iar în fig.6.7 se prezintă discurile montate pe axul principal al instalației, [142].

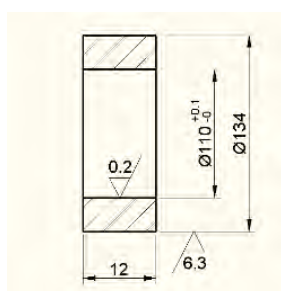


Fig.6.6 Discurile laterale și cel intermediar pregătite în vederea montării în instalația experimentală

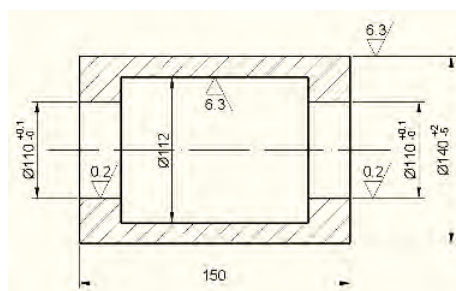


Fig.6.7 Discurile suport laterale și intermediare, pregătite în vederea montării probelor

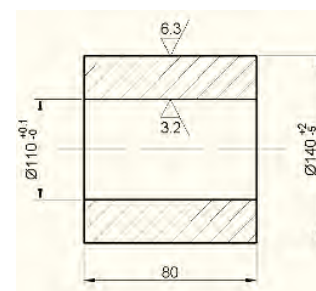
Între discurile laterale și cel intermediar se montează inele cu rol de distanțare, care permit menținerea discurilor pe axul principal la o distanță prestabilită, în funcție de dimensiunea probelor experimentale, fig.6.8a. În vederea fixării discurilor laterale pe arborele instalației se montează bușe, atât într-o parte, cât și în cealaltă. În fig.6.8b și c se prezintă schemele constructive ale bușelor de fixare, [144].



a- inel distanțier



b- bușă de fixare dreapta



c – bușă de fixare stânga

Fig.6.8 Schemele constructive ale inelelor distanțiere și ale bușelor de fixare montate pe axul principal al instalației

În fig.6.9 se prezintă inelele și bușele realizate în vederea montării lor în instalația experimentală.



a- inele distanțiere



b- bușă de fixare dreapta



c – bușă de fixare stânga

Fig.6.9 Inele și bușele realizate în vederea montării lor în instalația experimentală

În fig.6.10 se prezintă schema constructivă a unei probe experimentale, iar în fig.6.11 se prezintă o probă realizată în vederea montării în instalația experimentală. Experimentările se pot efectua concomitent pe 2 loturi de probe, fiecare lot avînd câte 12 probe care sunt montate tangențial la axul instalației. În fig. 6.12 se prezintă un lot de probe pregătit în vederea montării în instalația experimentală, [142].

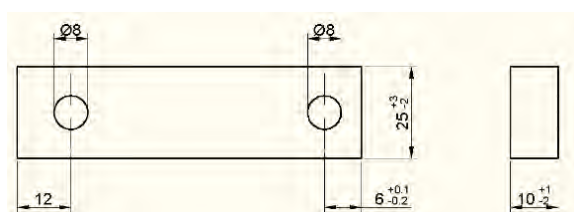


Fig.6.10 Schema constructivă a unei probe experimentale



Fig.6.11 Probă experimentală

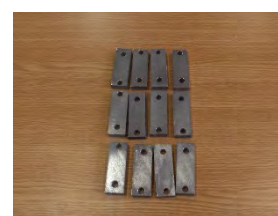


Fig.6.12 Lot de probe

În fig.6.13 se prezintă schema constructivă de fixare a probelor pe discurile suport laterale și intermediare. Proba 1 se montează pe discurile suport laterale 2 și intermediare 3. Fixarea rigidă a probelor se realizează prin intermediul șuruburilor 4, cu piulițele de strângere 5 și contrapiulițele de fixare 6, [142-145].

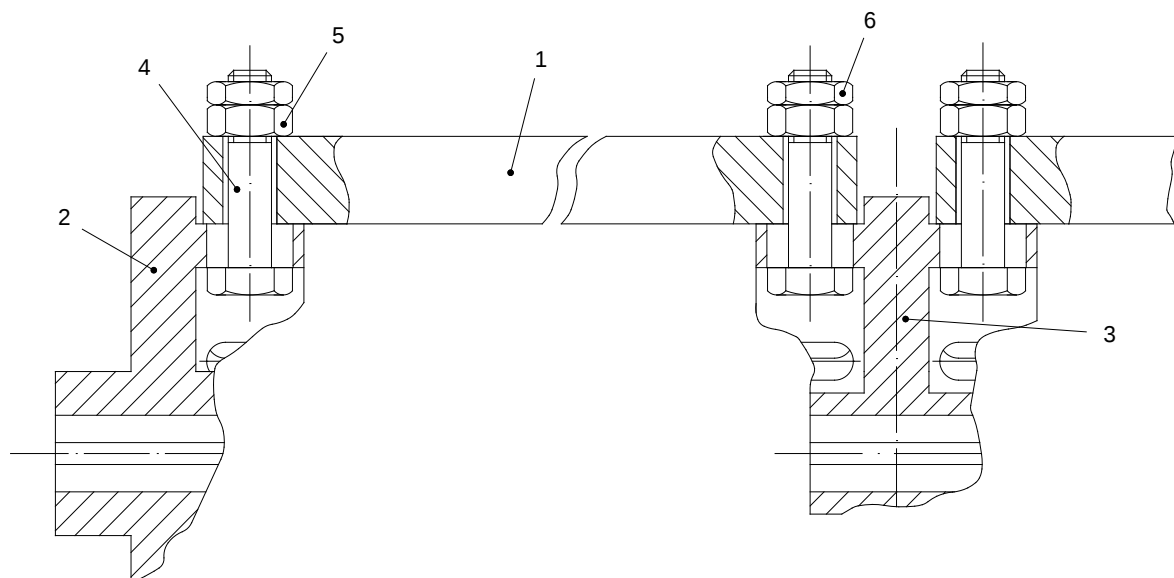


Fig.6.13 Schema constructivă de fixare a probelor experimentale pe discurile suport laterale și intermediare

În vederea punerii în funcțiune a instalației s-a ales un motor electric de acționare având puterea de 2,2 KW și turația de 1425 rot/min. Cuptorul electric destinat încălzirii probelor este comandat de un sistem automat care permite menținerea temperaturii în timpul experimentărilor la valoarea dorită. În fig. 6.14 se prezintă sistemul automat de comandă care cuprinde panoul de comandă cu automat programabil pentru încălzirea probelor cu ajutorul căruia se poate stabili și menține o anumită temperatură impusă pentru mediul din interiorul cuptorului, [142-145].



Fig.6.14 Sistemul automat de comandă al instalației

Principiul cercetărilor presupune montarea în două probe așezate diametral opus pe circumferința discurilor suport a unor termocupluri de tipul Pt-Pt/Rh. Termocuplul ales are o inerție mare de răspuns, domeniul de măsurare fiind $-50...1750^{\circ}\text{C}$ mm și sensibilitatea de $6\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Alegerea termocuplelor cu inerția de răspuns sub o zecime de secundă s-a realizat datorită faptului că încălzirea și răcirea probelor în instalația experimentală are loc foarte rapid, la fel ca și procesul de funcționare al motoarelor autovehiculelor. În cazul în care inerția de răspuns a termocuplurilor nu corespunde situației reale din procesul de funcționare al motorului, acestea nu pot sesiza variațiile câmpurilor de temperaturi, [142-145]. În fig.6.15a se prezintă două probe experimentale în care au fost montate termocupluri care au fost protejate cu ajutorul unor piese metalice, ansamblul acestora fiind prezentat în fig.6.15b, [144].



Fig.6.15a Probe experimentale în care au fost montate termocuple în vedere determinărilor experimentale



Fig.6.15b Ansamblul probe-termocuple-piese de protecție montate în vederea montării în instalația experimentală

În fig.6.16 se prezintă schema constructivă a pieselor de protecție a termocuplurilor care au permis montarea acestora în instalația experimentală.

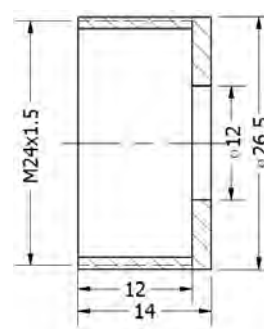
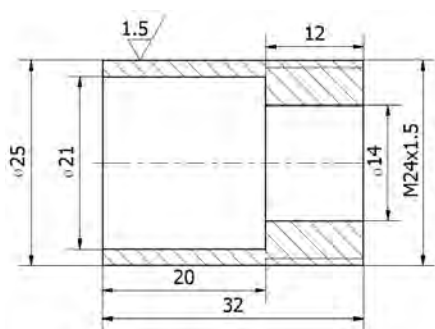


Fig.6.16 Schița pieselor de protecție a probelor cu termocuple, în vederea montării în instalația experimentală

Conductorii termocuplurilor sunt introduși prin alezajul axului principal la colectorul de termotensiune și apoi la un sistem de achiziție de date care permite înregistrarea simultană pentru întreg lotul de probe variațiile de temperaturi care apar în acestea pe durata experimentărilor, fig.6.17.

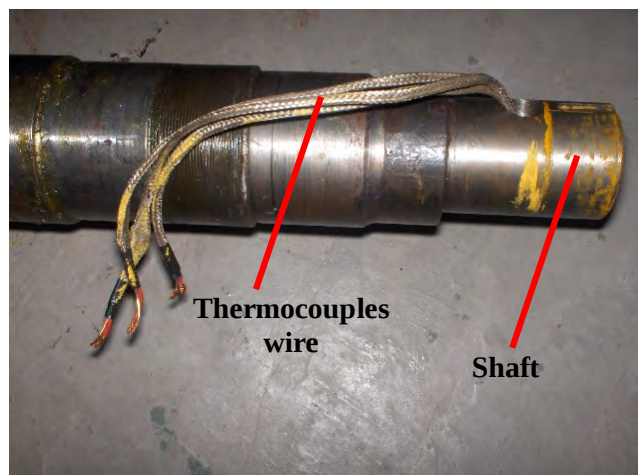


Fig.6.17 Termocupluri trecute prin axul principal al instalației în vederea conectării lor la colectorul de termotensiune

Colectarea termotensiunilor din termocupluri se realizează prin intermediul inelelor executate din cupru, montate pe discuri izolate din componența colectorului de termotensiune. Legătura dintre acesta și axul principal se asigură prin intermediul unui cuplaj. Conductorii electrici de la perile colectoare ale colectorului de termotensiune sunt conectați la un sistem de achiziție de date care, prin intermediul unei mufe de transmisii date face legătura cu calculatorul. Acesta înregistrează fișierele care cuprind variațiile de temperaturi din probele experimentale. În fig.6.18 se prezintă colectorul de termotensiune utilizat în instalația experimentală și legăturile acestuia spre sistemul de achiziție de date. În această figură avem următoarele elemente: 1-cuplaj; 2-inele din cupru montate pe discuri izolate din textolit; 3 - perii de cărbune; 4- colector de termotensiune; 5-elemente de conectare; 6- cutie de conexiuni; 7-calculator cu sistem de achiziție de date. Legătura dintre axul principal și colectorul de termotensiune se asigură prin cuplajului 1, [142,144].

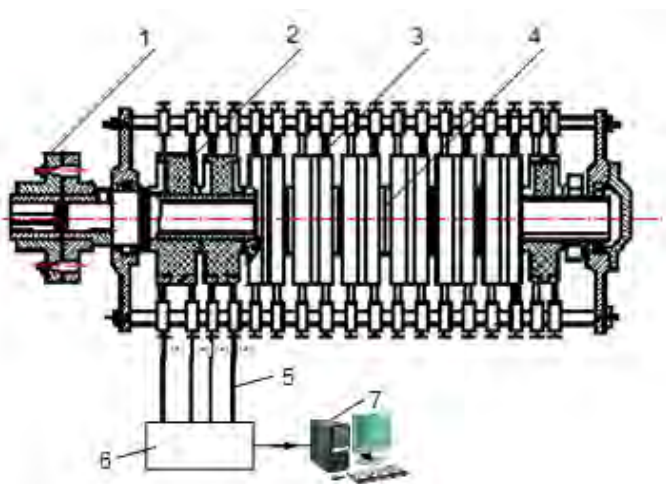


Fig.6.18 Schema constructivă a colectorului de termotensiune și legăturile la sistemul de achiziție de date

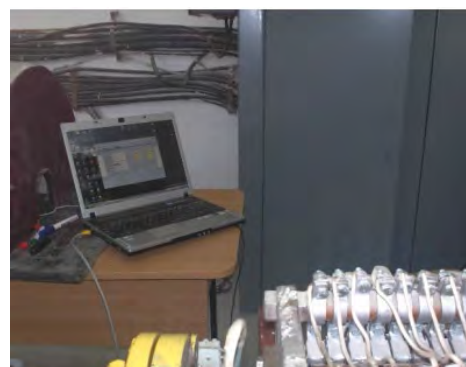


Fig.6.19 Cotectorul de termotensiune și sistemul de achiziție de date

În fig.6.19 se prezintă intalația conectată la sistemul de achiziție de date prin intermediul colectorului de termotensiune, [144]. În vederea determinării temperaturii în mediul de răcire, în partea inferioară a instalației există o probă în care se află montat un termocuplu pentru a stabili temperatura mediului de răcire, fig.6.20.



a- vedere de jos a probei experimentale



b- vedere de sus a probei experimentale

Fig.6.20 Montajul probei pentru determinarea temperaturii în mediul de răcire

Loturile de probe sunt supuse unor regimuri de solicitare, urmărindu-se momentul apariției primelor fisuri de oboseală termică, pe stratul superficial al acestora. Pentru aceasta, se impune ca turația motorului electric să se poată în intervalul 100 -1400 rot/min, acest lucru realizându-se prin intermediul unui reostat, [142,144,145].

După determinarea numărului de cicluri de solicitare până la apariția primelor fisuri de oboseală termică pe suprafața probelor, se realizează histograme care reflectă rezistența la oboseală termică pentru fiecare material și organ de mașină studiat, [143-145].

Instalația a fost premiată cu:

- Diploma de excelență și medalia PRO INVENT la Salonul Internațional al Cercetării Științifice, Inovării și Inventicii PRO INVENT, Ediția XVII, 20-22 martie 2019, Cluj-Napoca;
- Medalia de aur la EURO INVENT, Ediția 11, Expoziția Europeană de Creativitate și Inovare, 18 mai 2019, Iași
- Medalia de aur la Salonul Internațional de Invenții și Inovații "Traian Vuia", 14 iunie 2019, Timișoara;
- Medalia INVENTICS 2020, la INVENTICA 2020 Ediția XXIV Expoziția Internațională de Inventică, 29-31 iulie, 2020, Iași
- Premiul special și medalia de aur la Expoziția Internațională INVENTCOR 2020, Ediția 1, 17-19 decembrie Deva
- Medalie de argint la Salonul Internațional de Invenții și Inovații "Traian Vuia", 15 octombrie 2020, Timișoara;

6.4 Validarea instalației prin determinări experimentale

În vederea validării instalației au fost efectuate determinări experimentale în vederea stabilirii regimurilor de solicitare termică din probe. În acest sens, s-a realizat un lot complet de probe care a fost supus unor variații ciclice de temperatură.

În ceea ce privește încălzirea probelor, temperatura în interiorul cuptorului a fost menținută la 900°C, iar răcirea s-a efectuat în aer. Sistemul de achiziție de date a înregistrat atât valorile temperaturilor din probe, cât și diagrame de temperaturi, fig.6.21. Alura diagramei prezentate confirmă existența în probe a variațiilor ciclice de temperatură, lucru care validează concepția instalației. Variațiile de temperaturi din probele experimentale au fost înregistrate la intervale de timp foarte mici, ceea ce indică faptul că sistemul modelează situația reală din timpul funcționării motoarelor cu ardere. Fig.6.22 prezintă evoluția temperaturii din interiorul cuptorului instalației experimentale. La pornirea sistemului, temperatura crește de la zero la valoarea de 900°C după care se menține la această valoare în timpul experimentelor. În diagramă se prezintă o secvență care include doar creșterea temperaturii până la valoarea de 450°C, [140].

În viitoarele experimentări, care presupun un interval mare de timp, se are în vedere micșorarea numărului de cicluri de solicitare până la apariția primelor fisuri de oboseală termică. Astfel, se poate admite ca temperatura probelor să fie cât mai ridicată posibil, iar răcirea să fie rapidă și accentuată, [140,144].

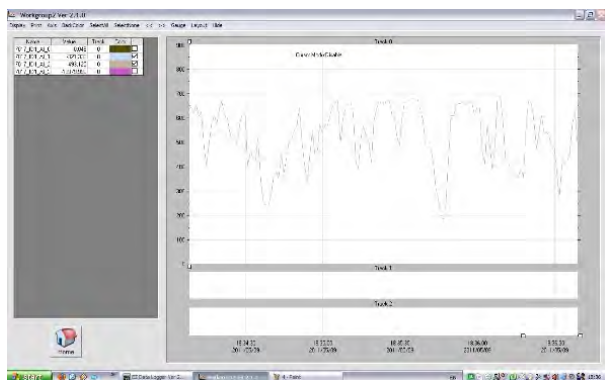


Fig. 6.21 Diagrama variației câmpului de temperatură în probă

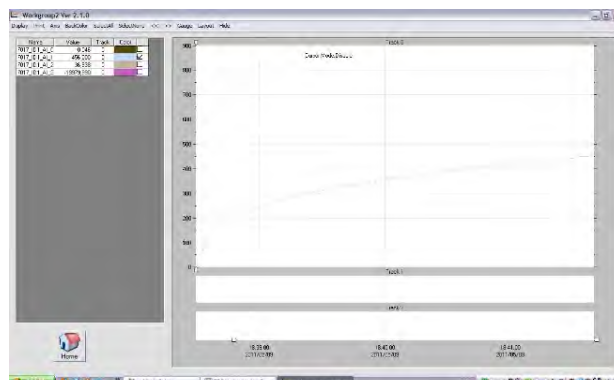


Fig.6.22 Diagrama temperaturii din interiorul cuptorului

Diagramele de temperaturi obținute experimental confirmă existența câmpurilor variabile ciclice din probele montate în instalația experimentală. Diagrama de variație a temperaturii arată că variația temperaturilor este de ordinul secundelor, în concordanță cu ciclul de lucru al motorului. Aceste diagrame de temperaturi permit evaluarea câmpurilor variabile de temperaturi și determinarea tensiunilor termice asociate. Cunoșterea lor oferă posibilitatea realizării unei comparații cu cele determinate prin metode numerice, utilizate în mod obișnuit la proiectarea organelor de mașini fixe și mobile din componența motoarelor cu ardere internă. Instalația experimentală menită să studieze oboseala termică a fost proiectată și construită pe baza unor concepte și metode de modelare în laborator disponibile în prezent în literatură și a fost validată în urma rezultatelor. Pe de altă parte, instalația poate fi utilizată pentru studiul rezistenței la oboseală termică și a altor piese din ansamblul autovehiculului sau a altor utilaje a căror componente sunt supuse fenomenului de oboseală termică. Experimentările care pot fi efectuate pe această instalație deschid direcția pentru dezvoltarea de materiale cu rezistență ridicată la oboseala termică, permițând dezvoltarea pieselor de înaltă performanță, [140].

6.5 Concluzii

Studiul oboselii termice în condiții de laborator conduce la stabilirea limitelor de rezistență la oboseală termică pentru diferite organe de mașini supuse acestui fenomen.

Pe baza principiilor de modelare și având la bază metoda calitativă de încercare s-a realizat o instalație experimentală pentru studiul fenomenului de oboseală termică care apare la organele de mașini fixe și mobile din componența motoarelor autovehiculelor. Validitatea datelor obținute la încercările experimentale și a concluziilor stabilite în urma acestora depind în mare măsură de metoda încercărilor.

În general, încercările de oboseală termică au un caracter complex și numai prin alegerea judicioasă a metodei de experimentare și prin prelucrarea și interpretarea corectă a datelor obținute se pot obține rezultate corespunzătoare. Instalația experimentală concepută și realizată în scopul studiului fenomenului de oboseală termică a organelor de mașini care participă la realizarea transferului termic la motoarele cu ardere internă permite determinarea rezistenței la oboseală termică a acestora până la apariția fisurilor specifice acestui fenomen.

Cunoașterea rezistenței la oboseală termică a acestor organe de mașini permite determinarea duratei lor de exploatare estimată prin număr de cicluri până la apariția pe suprafața probelor a primelor fisuri de oboseală termică. Realizarea instalației experimentale permite stabilirea limitelor de rezistență la oboseală termică pentru diferite organe de mașini supuse acestui fenomen, evitarea apariției fisurilor de oboseală termică prin optimizarea regimului termic al motorului și propunerea de noi materiale cu rezistență ridicată la apariția acestui fenomen.

Avantaje pe care le are instalația sunt următoarele:

- permite cercetarea experimentală a oboselii termice pe probe metalice care pot să aibă în secțiune, formă și dimensiuni diferite, cu lungimi aproximativ egale pe seturi, montate tangențial pe generatoarea discurilor suport;
- permite modernizarea sistemului tradițional de determinare experimentală a rezistenței la oboseală termică pe probe executate din materiale metalice solicate la diferite regimuri termice ciclice;
- reduce semnificativ timpul de determinare experimentală la oboseală termică a materialelor metalice care lucrează în condiții de temperaturi variabile;
- temperatura de încălzire a probelor în cuptor poate fi impusă și menținută la limita dorită și poate fi înregistrată, numeric și grafic, cu ajutorul sistemului de achiziție de date;
- timpul ciclurilor de încălzire și răcire a probelor poate fi modificat în funcție de numărul de rotații al axului principal, respectiv al motorului electric de acționare, prin panoul de comandă al convertorului static de frecvență.

Transpunerea cercetărilor asupra rezistenței la oboseală termică a cilindrilor de laminare la cald la alte organe de mașini supuse acestui fenomen, prin conceperea și realizarea unei instalații adecvate în acest sens, constituie **GRADUL DE INOVARE** al acestor cercetări.

Realizarea acestei instalații deschide o direcție de cercetare pe care autoarea acestei teze de abilitare intenționează să o studieze în continuare. În acest context, studiului fenomenului de oboseală termică care apare în organele de mașini fixe și mobile din componența motoarelor cu ardere internă presupune parcurgerea următoarelor etape:

- observarea consecințelor efectelor solicitărilor termice ciclice, respectiv a efectelor fenomenului de oboseală termică asupra acestor organe de mașini, prin studiul literaturii de specialitate la nivel național și internațional, precum și din examinările și observațiile efectuate de către companiile care comercializează autovehicule;
- cunoașterea regimului termic al organelor de mașini din componența motoarelor cu ardere internă;
- studiul rezistenței la oboseală termică a organelor de mașini participante la realizarea ciclului motor;
- posibilitatea testării de materiale cu rezistență ridicată la oboseală termică.

Deasemenea, pe lângă aceste cercetări, instalația permite studiul și a altor organe de mașini supuse fenomenului de oboseală termică, un exemplu concludent în acest sens fiind discurile de frână ale autovehiculelor care participă la concursuri de drift și care sunt supuse la frânări intensive într-un interval relativ scurt de timp.

CAPITOLUL 7

STUDIUL CARACTERISTICILOR MATERIALELOR COMPOZITE ECOLOGICE DESTINATE REALIZĂRII PLĂCUȚELOR DE FRÂNĂ PENTRU AUTOVEHICULE RUTIERE

7.1 Argumentarea direcției de cercetare

A doua direcție abordată în cercetare de către autoarea acestei teze de abilitare a luat naștere plecând de la problemele de mediu produse de gazele cu efect de seră și schimbările climatice care apar în urma eliberării acestora în atmosferă. Necesitatea elaborării unor materiale noi și a unor tehnologii neconvenționale a fost determinată nu numai de motive economice și sociale, dar și de faptul că în condițiile dezvoltării producției, a apărut o criză a surselor de materii prime și energetice, [79,155,157].

Îmbunătățirea continuă a produselor implică, în primul rând, găsirea de materiale noi care să ofere performanțe superioare în funcționarea acestora. De multe ori, un produs nou nu este neapărat o invenție, ci o dezvoltare a produselor existente sub aspectul materialului și a tehnologiei de fabricație. În acest context, temele actuale ale cercetării în domeniul științei și ingineriei vizează dezvoltarea unor materiale cu performanțe superioare, care să răspundă exigențelor industriei moderne, simultan cu aplicarea unor tehnologii de prelucrare de maximă eficiență economică, [79].

În ceea ce privește exigențele actuale privind siguranța rutieră acestea impun dezvoltarea unor noi soluții tehnice pentru sistemele componente ale autovehiculelor. Aceste sisteme sunt realizate din componente cu funcții multiple în ansamblul autovehiculului, funcționarea optimă a acestuia fiind asigurată atât de fiecare subansamblu în parte, cât și de ansamblul legăturilor care există între ele. Fiecare subansamblu, la rândul său, este alcătuit din mai multe repere care pot fi realizate dintr-o mare diversitate de materiale. Performanțele tehnice ale subansamblelor și implicit ale autovehiculului din care acestea fac parte, depind de caracteristicile fizico-mecanice ale materialelor din care sunt realizate reperele respective, [58,150-152,158,164-167].

Multe componente ale autovehiculelor contribuie, activ sau pasiv, la creșterea performanței în funcționare. Siguranța este strâns legată de eficiența sistemului de frânare, acesta fiind unul dintre cele mai importante componente dintr-un autovehicul, [154,158]. În cazul componentelor sistemului de frânare al autovehiculelor, siguranța în funcționare este condiționată de trei factori, respectiv concepția constructivă, materialele utilizate și controlul electronic, [51,58,150]. Dintre acești factori alegerea materialelor și a proceselor de prelucrare este o etapă dificilă, dar foarte importantă pentru realizarea performanțelor tehnice și obținerea unui cost relativ mic al produsului finit, [58,87,150,153]. Alegerea are la bază promovarea de materiale cu preț de cost scăzut, ușor de achiziționat, realizându-se valorificarea optimă a proprietăților tehnologice ale acestora, [51,58,150,153].

Pe fondul necesității unei resurse sustenabile de materii prime, precum și a problemelor de mediu cauzate de materialele plastice și cele metalice, greu degradabile, producătorii de autovehicule sunt mereu în căutarea unor materiale cu impact redus asupra mediului care, după încheierea ciclului de viață, să fie ușor reciclabile și biodegradabile. Aceste materiale trebuie să asigure în funcționare aceleași performanțe ca și cele metalice, dar să fie produse într-un mod cât mai ecologic posibil, [79,87,91,157,159]. Impactul asupra mediului înconjurător poate fi văzut sub trei forme și anume: epuizarea resurselor, materialele și energie, poluarea datorită activităților umane, toxicitate și riscuri cu privire la sănătatea umană, [50,87,89,90,91].

Datorită problemelor de mediu cauzate de volumul mare de deșeuri, se impune o orientare spre utilizarea materialelor compozite organice. Deși fibrele naturale au proprietăți mecanice scăzute, acestea prezintă unele avantaje (densitatea scăzută și biodegradabilitatea) motiv pentru care sunt apreciate în domeniile în care greutatea materialelor joacă un rol important, un astfel de domeniu fiind și cel al autovehiculelor, [50,51,150]. Greutatea materialelor utilizate în construcția unui autovehicul influențează cantitatea de CO₂ emisă în atmosferă cu efecte nefaste asupra mediului, [87,147,156,159].

În acest context, preocupările actuale legate de mediu și de sănătatea umană au constituit obiectul mai multor lucrări din literatura de specialitate, [55-74]. Recent, sistemul de frânare al autovehiculelor este considerat de către autoritățile europene o sursă de emisii poluante în aerul urban ca urmare a frecării dintre discurile și plăcuțele de frână, [90]. Aceste particule emise în atmosferă ca urmare a funcționării sistemelor de frânare a autovehiculelor afectează mediul și sănătatea umană atât prin mărimea și concentrația lor în aer, cât și prin compoziția lor chimică [91,159].

Mecanismul principal de producere a particulelor fine ca urmare a procesului de frânare constă în exercitarea forțelor de frecare între discurile și plăcuțele de frână în timpul decelerării autovehiculelor, [89, 159]. Mecanismul secundar constă în evaporarea compușilor organici care intră în componența acestora ca urmare a temperaturilor ridicate din timpul frânării, [89,91,159]. Particulele fine inhalate din aerul atmosferic se pot depozita în nas și gât provocând iritații și alergii. Particulele ultrafine pot pătrunde în plămâni, crează radicali liberi în celulele organismului și pot produce modificări ale ADN-ului, reacții de oxidare și stres biologic. Deasemenea, aceste particule foarte mici pot fi transmise prin sânge către alte țesuturi și organe (ficat, rinichi, creier, etc.), cu efecte negative asupra sănătății [89-91,159].

În vederea reducerii impactului acestor emisii poluante asupra mediului și a sănătății umane, o importanță deosebită o are reducerea emisiilor poluante direct la sursă, adică prin utilizarea fibrelor naturale în fabricarea discurilor și a plăcuțelor de frână. Cercetătorii au demonstrat că fibrele naturale pot oferi soluții adecvate, ecologice și economice, în condițiile asigurării performanțelor în funcționare [89-91,159]. În ultimul deceniu, numeroasele cercetări s-au axat pe utilizarea ingineriei ecologice în producerea diferitelor componente ale autovehiculelor care au pe lângă beneficii pentru sănătatea umană și efectul de protejare a mediului, conservarea resurselor naturale și, nu în ultimul rând, creșteri economice apreciabile, [89-91,159].

În sistemul de frânare al autovehiculelor moderne, frâna cu disc are un rol important în asigurarea performanței și siguranței în frânare. Discul și plăcuța de frână funcționează împreună și sunt cele mai solicitate componente ale sistemului de frânare. În acest ansamblu însă, elementul hotărâtor care decide performanța frânării este plăcuța de frână, [50,89-91,150]. În contextul actual, plăcuța de frână reprezintă una dintre componentele de bază în cursa pentru dezvoltarea unui transport ecologic, [58,150]. Cercetarea privind plăcuțele de frână ecologice este susținută de inițiativa pentru tehnologii durabile care presupune utilizarea fibrelor naturale în producerea acestora. Astfel, cercetările au demonstrat că fibrele regenerabile ar putea reduce dependența de materiale sintetice și ar permite înlocuirea constituenților de metale grele cu alternative mai sigure pentru mediu și sănătatea umană, [89].

Principalul obiectiv al acestei direcții de cercetare este de a dezvolta noi materiale pentru plăcuțele de frână, pe bază de fibre naturale, capabile să reducă emisia de particule fine rezultate de la sistemele de frânare ale autovehiculelor. Testarea și aprecierea funcționalității acestora se va realiza prin intermediul unei abordări multianalitice. Utilizarea diferitelor instrumente experimentale oferă o caracterizare completă a materiilor prime și a suprafețelor rezultate ca urmare a tehnologiei de fabricație, [58, 63,146-163]. În acest context s-au produs în laborator materiale de fricțiune pentru plăcuțele de frână având în componență materiale organice, cum ar fi: fibră de nucă de cocos și pulbere din cochiliile scoicilor marine. Acestea sunt materiale ecologice, rezistente la uzură și pot fi combinate cu alte materiale fără efecte nefaste asupra mediului și a sănătății umane. Plăcuțele de frână obținute sunt destinate autovehiculelor de dimensiuni mici și performanțe medii, [146-163].

În literatura de specialitate s-au mai produs plăcuțe de frână cu diferite fibre organice, respectivele lucrări științifice fiind utilizate pentru compararea rezultatelor obținute de autoare în cadrul studiului, [55-88].

Principalele obiective urmate în studiu au fost:

- formularea rețetelor materialelor compozite;
- alegerea parametrilor tehnologiei de sinterizare;
- producerea în laborator a materialelor compozite;
- determinarea caracteristicilor fizico-mecanice și tribologice;
- evaluarea performanțelor materialelor obținute;
- compararea rezultatelor cu cele din literatura de specialitate.

7.2 Materiale destinate fabricării plăcuțelor de frână ecologice

Frânarea este procesul prin care se reduce parțial sau total viteza de deplasare a autovehiculului. În timpul frânării, o parte din energia cinetică acumulată de autovehicul se transformă în energie termică prin frecare, iar o parte se consumă pentru învingerea rezistențelor la rulare și a rezistenței aerului, care se opun mișcării. Cantitatea mare de căldură care se degajă în timpul frânării contribuie la înrăutățirea calităților de frânare ale autovehiculului și grăbește uzarea plăcuțelor de frână, precum și a celorlalte componente ale sistemului de frânare, [58,146,153,157-159].

În ultimii ani, creșterea continuă a calităților dinamice ale autovehiculelor, dar și a traficului, au accentuat importanța sistemului de frânare în asigurarea recursivității circulației, [151,159]. Cerințele impuse în funcționare unui sistem de frânare sunt: eficacitate, stabilitate, fidelitate și confort. Astfel, eficacitatea sistemelor de frânare asigură punerea în valoare a performanțelor de viteză ale autovehiculelor. O eficacitate mare a sistemului de frânare duce la obținerea unor viteze de deplasare mari, caz în care indicii de exploatare ai autovehiculului au valori ridicate, [58,60,67,130,147,149,151,153-159].

Stabilitatea sistemului de frânare presupune conservarea calităților de frânare ale autovehiculului prin menținerea forțelor de frânare constante în toate condițiile de funcționare ale autovehiculului. În cazul frânelor cu fricțiune, aceasta depinde de stabilitatea coeficientului de frecare al plăcuțelor de frână. În cazul utilizării normale, regimul termic al frânelor nu trebuie să depășească 300°C, pentru a asigura un coeficient de frecare constant. În acest scop, plăcuțele de frână trebuie să asigure evacuarea energiei calorice care se produce în timpul procesului de frânare deoarece, în cazul unei încălziri excesive, apar zgomote și trepidatii, se modifică structura materialului din care sunt realizate, se reduce coeficientul de frecare, toate acestea ducând la diminuarea eficacității și micșorarea siguranței circulației, [58,66].

Gama de materiale folosite la fabricarea plăcuțelor de frână variază de la azbest la formule organice, semimetalice și ceramice, [58,68,86,150]. În trecut, azbestul era un material preferat în procesul de fabricare al plăcuțelor de frână deoarece acesta prezintă o bună capacitate de a disipa căldura, dar s-a dovedit a fi un material dăunător sănătății umane, [58,68,89,91,151,156,159,170]. În prezent, plăcuțele de frână sunt realizate din fibre minerale, organice, aramid, celuloză, fibră de sticlă, fibre de cupru și oțel. În funcție de proprietățile acestor materiale variază și gradul de uzură al discurilor de frână, [58, 158,163].

Fiecare material are avantajele și dezavantajele sale legate de: condițiile de mediu, uzură, zgomot, capacitatea de frânare, însă proprietățile finale ale fiecărui tip de plăcuță de frână sunt influențate de materialul abraziv, [58,59, 147-159]. În literatura tehnică de specialitate sunt precizate patru tipuri de plăcuțe de frână, în funcție de tipul materialului care intră în contact cu discul de frână și anume, materiale metalice, semi-metalice, organice, și ceramice, [58,59,65, 146-159,163].

Plăcuțele de frână metalice au în componența lor oțel, cupru, grafit, în proporție de 65% care, în combinație cu alte materiale, permit un transfer termic eficient. Acestea dezvoltă zgomot mare, se uzează mai repede, rezultând o mare cantitate de particule de praf fin, care sunt atrase de metalul din jantă și din ansamblul sistemului de frânare, rezultând astfel, o depunere de culoare neagră pe interiorul jantei și a etrierului. Acestea funcționează optim atât la o temperatură joasă, cât și la una înaltă, [58].

Plăcuțele de frână semi-metalice au un conținut de 30-65% metal, compuși anorganici și rășini cu rol de legătură. Acestea au o conductivitate termică ridicată și o durabilitate mare, dar prezintă un zgomot puternic, producând o uzură mare a discurilor de frână, [58].

Plăcuțele de frână organice conțin metale în proporție mai mică de 30%. Avantajele acestora se referă la faptul că sunt ecologice, ușor de reciclat, sunt silențioase datorită durității mici a materialului, însă se uzează mai repede, ceea ce implică înlocuirea lor la intervale relativ scurte de timp. Coeficientul de frecare variază între 0,3 și 0,5. Deasemenea, ele provoacă uzură mai mică asupra discului de frână. Ca dezavantaje, acestea prezintă rezistență scăzută la uzură și temperatură de funcționare scăzută. Plăcuțele de frână organice sunt folosite la autovehiculele mici, cu performanțe medii, fiind total neindicate pentru modelele sportive sau vehiculele de mare tonaj. Un alt dezavantaj al acestora este faptul nu au o comportare bună în condiții de umiditate, [58].

Plăcuțele de frână ceramice sunt realizate din fibre de ceramice, materiale neferoase, agenți de lipire și uneori mici cantități de metal. Acestea au o capacitate mare de transfer de căldură, o durabilitate mare, produc mai puțin praf, au un zgomot redus și o uzură redusă a discului de frână. Ele se

utilizează doar la autovehiculele ușoare, nefiind recomandate celor medii și grele, iar prețul lor este mai mare comparativ cu a celorlalte plăcuțe de frână, [150-158].

În ceea ce privește fabricarea plăcuțelor de frână, literatura de specialitate indică existența unor norme guvernamentale care restricționează folosirea unor materiale în procesul de fabricație al plăcuțelor de frână, [58]. Pentru autoturismele ușoare, cu performanțe mici, specialiștii recomandă plăcuțele de frână din materiale organice.

7.3 Producerea, caracterizarea și testarea materialelor cu fibră de nucă de cocos

7.3.1 Materiale și tehnologie

Principalele categorii de materiale care intră în compoziția plăcuțelor de frână sunt: *materiale abrazive, modificatori de frecare, material de umplutură și lianți*, [58]. Există însă o oarecare ambiguitate în această clasificare, deoarece unele componente pot fi încadrate în mai multe categorii datorită faptului că îndeplinesc mai multe funcții. Pentru a analiza rolul acestora în frecare și uzare este insuficientă doar cunoașterea compoziției lor, deoarece atât comportamentul la frecare, cât și la uzare sunt influențate de forma, distribuția și dimensiunea particulelor care le alcătuiesc [58,59,83,84,85,164-172].

În vederea stabilirii rețetelor pentru producerea materialelor de fricțiune destinate realizării plăcuțelor de frână s-a plecat de la un amestec de materii prime, care cuprinde: *aluminiu, grafit, oxid de zirconiu, carbură de siliciu, oxid de titan, sulf, rășină fenolică (de tip Rășnov) hexametiltetramină și fibră de nucă de cocos*. Hexametiltetramina are rolul de a transforma termoplastul în termorigid, [58,72,85,151,159]. Alegerea acestora s-a făcut având în vedere destinația plăcuțelor de frână (pentru autovehiculele cu dimensiuni mici și performanțe medii) și în conformitate cu literatura de specialitate. Rețetele după care s-au produs materialele compozite organice sunt prezentate în tabelul 7.1, [72,147,151,158,163].

Tabelul 7.1

Compoziția chimică a materialelor compozite

Probe	Aluminiu [%]	Grafit [%]	Oxid de zirconiu [%]	Carbură de siliciu [%]	Oxid de titan [%]	Rășină fenolică [%]	Hexametyl tetramină [%]	Fibră nucă de cocos [%]
C1	20	5	2	11	11	40	6	5
C2	15	5	2	11	11	40	6	10

Producerea materialelor de fricțiune are la bază metalurgia pulberilor [57-68,147-159]. Principalul motiv pentru care se face uz de metalurgia pulberilor este obținerea unei omogenități crescute a acestora, cu implicații majore în obținerea unor caracteristici fizico-mecanice și tribologice superioare, [58-61,147-159,166]. Parametrii tehnologiei de sinterizare au fost stabiliți ca urmare a mai multor încercări experimentale, care au permis efectuarea unor analize critice și îmbunătățiri succesive, [58,147-149,151,153,163,169]. Acești parametri utilizați în obținerea materialelor compozite cu fibră de nucă de cocos se prezintă în tabelul 7.2.

Tabelul 7.2

Parametrii tehnologiei de sinterizare

Temperatura de încălzire [°C]	Timp de menținere în cuptor [min]	Forța de presare [KN]	Regim de răcire			
			În cuptor		În aer	
			Temperatură [°C]	Timp [min]	Temperatură [°C]	Timp [min]
200	60	20	100	480	25	2880

Principali factori care influențează obținerea unor probe compacte sunt: forța de presare, timpul de menținere în cuptor, regimul de răcire și ordinea de amestecare a constituenților, [58, 85, 147-149].

150]. Probele obținute au formă și structură corespunzătoare și pot fi utilizate pentru realizarea de epruvete în vederea determinării caracteristicilor fizico-mecanice și tribologice.

7.3.2 Caracteristici fizico-mecanice și tribologice

În vederea caracterizării și testării materialelor compozite produse în laborator s-au realizat probe disc, fig.7.1, din care s-au realizat epruvete destinate determinării caracteristicilor fizico-mecanice, fig.7.2, precum și probe cilindrice sub formă de pini pentru determinarea caracteristicilor tribologice, fig.7.3.



Fig. 7.1 Probe disc produse în laborator



Fig.7.2 Epruvete pentru determinarea caracteristicilor fizico-mecanice



Fig.7.3 Pin realizat în vederea determinării caracteristicilor tribologice

Pentru materialele compozite produse în laborator s-a determinat densitatea, porozitatea în ulei și apă, duritatea, modulul de elasticitate longitudinal, rezistența la compresiune, rezultatele fiind prezentate în tabelul 7.3.

Tabelul 7.3

Caracteristicile fizico-mecanice ale materialelor cu fibră de nucă de cocos

Probe	Densitate [g/cm ³]	Porozitate [%]		Duritate HRS	Forța de rupere [N]	Modulul lui Young [N/ mm ²]	Rezistența la compresiune [N/mm ²]
		Ulei	Apă				
C1	1,57	0,29	0,75	59	12887	262999,142	-27,6141
C2	1,35	0,16	0,55	61	15766	32537,454	-38,7788

Din tabelul 7.3 se observă că, valorile densităților pentru cele două materiale compozite sunt relativ scăzute comparativ cu densitățile metalelor, aceasta explicându-se prin faptul că în proba C2 există o cantitate mai mică de aluminiu. Pe de altă parte, densitățile probelor au scăzut cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos. În literatura de specialitate s-au mai produs materiale de fricțiune în care ca material de umplutură s-a utilizat fibra de nucă de cocos, [56,57,58,60-62,147-149,159], iar concluziile obținute sunt similare cu cele obținute în respectivele lucrări.

În ceea ce privește capacitatea de absorbție a apei și a uleiului, acestea scad cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos. Capacitatea redusă de absorbție a apei și a uleiului poate fi atribuită pe seama creșterii legăturii dintre liant și umplutură, datorate omogenizării corespunzătoare a constituenților, [57-61,69,147-159].

Conținutul variabil de fibre nucă de cocos și de aluminiu determină valori diferite ale durității probelor. Astfel, se observă că, cea mai mare valoare a durității s-a obținut pentru C2, această probă fiind realizată cu 10 % fibră de nucă de cocos, [58,60-61,147-149].

Din tabelul 7.3 se observă că proba C2 are cea mai mare rezistență la compresiune, respectiv cea mai ridicată valoare a forței la care se produce ruperea. Aceasta se explică prin faptul că, particulele de fibră de nucă de cocos s-au distribuit uniform peste matricea de aluminiu, realizându-se o interferență corespunzătoare dintre acestea, [147-149,158]. Valorile rezistențelor la compresiune și modulele de elasticitate longitudinală ale materialelor compozite produse, cresc odată cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos, concluzii similare fiind obținute și în, [58,61,80-84,88,152].

În vederea cunoașterii comportamentului tribologic al materialelor compozite produse s-au efectuat determinări experimentale care au avut ca obiective: studiul influenței unor parametri specifici regimului de lucru (forța de apăsare, viteza de alunecare, timpul de încercare, regimul de frecare) asupra caracteristicilor funcționale ale materialelor compozite, evoluția câmpului termic în zona cuplelor de frecare și studiul evoluției coeficientului de frecare în funcție de forța de apăsare. Cunoașterea acestor elemente oferă posibilitatea unor aprecieri cu privire la durabilitatea în exploatare a materialelor compozite destinate realizării plăcuțelor de frână, [158,160-163].

Studiul influenței unor parametri ai regimului de lucru se va efectua pe o instalație experimentală la care principiul de funcționare constă în apăsarea unui pin din materiale compozite (C1, C2) pe un disc rotativ realizat din fontă, în vederea determinării unor caracteristici de uzare [58,71,73,85]. În experiment, discul din fontă joacă rolul discului de frână, pinul din compozit pe cel al plăcuțelor, iar sarcina aplicată simulează presiunea de contact dintre cuplele de frecare.

Pentru efectuarea experimentărilor, s-au realizat probe cilindrice (pini) din materialele compozite (C1 și C2) și discuri din fontă în funcție de caracteristicile instalațiilor experimentale și a standardelor aferente metodei de testare.

Fonta necesară realizării discului din instalația de testare a fost produsă în laboratorul de „Topituri metalice” de la Facultatea de Inginerie Hunedoara. Încărcătura metalică a fost alcătuită din discuri din fontă și alți constituenți, cum ar fi: cocs, FeSi și FeMn, fig.7.4, urmărindu-se obținerea unei compoziții chimice cât mai apropiată de cea a discurilor de frână produse la ora actuală, conform standardelor în vigoare, [55,58,74-78,94]. Durata de topire a unei șarje a fost de 90 min, după care baia de metal s-a descărcat într-o formă cilindrică realizată din grafit, fig.7.5. După răcire, fonta a fost evacuată din formă și s-au prelevat epruvete cilindrice, cu diametrul de 96 mm, care au fost supuse prelucrărilor mecanice.



Fig.7.4 Fontă rezultată din discuri de frână scoase din uz



Fig.7.5 Formă cilindrică în care s-a evacuat șarja elaborată

Compoziția chimică a fontei cenușii obținută în laborator este prezentată în tabelul 7.4.

Tabelul 7.4

Compoziția chimică și duritatea fontei produsă în laborator

Compoziția chimică a fontei produsă în laborator (%)										HV ₁₀
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Co	Ti	V	
2.82	0.81	1.96	0.093	0.250	0.07	0.07	0.09	0.02	0.009	550

Microstructura fontei a fost investigată cu ajutorul microscopului optic și se prezintă în fig.7.6. Analiza acesteia indică apariția unui grafit lamelar de dimensiuni mici într-o matrice de bază ferito-perlitică, care acesta asigură o uzură mică și uniformă la frecare, [77-79].

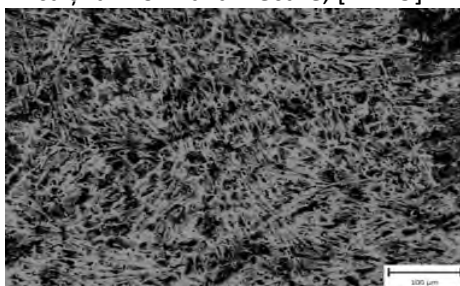


Fig. 7.6 Imagine SEM a probei realizată din fonta produsă în laborator - 100 x

Fonta produsă în laborator a fost asimilată cu marca G2500, conform normelor ASTM A 159, destinată realizării discurilor de frână pentru autovehicule, [58,71,152-160].

În vederea realizării pinilor din material compozit s-a conceput o matriță a cărei model se prezintă în fig. 7.7. În fig.7.8 se prezintă discul și pini utilizați în instalația experimentală pentru determinarea caracteristicilor tribologice pentru materialele compozite cu fibră de nucă de cocos.



Fig. 7.7 Model pentru matrița de realizare a pinilor din material compozit , [58]

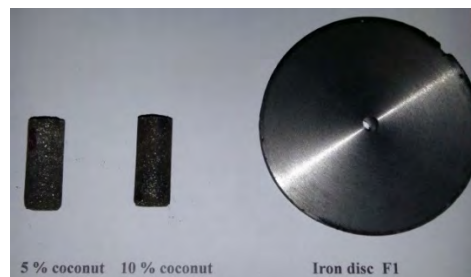


Fig.7.8 Disc din fontă și pini din material compozit utilizați la determinările tribologice

Principalii parametri utilizați în aceste experimentări se prezintă în tabelul 7.5.

Tabelul 7.5

Parametrii determinărilor experimentale

Viteza de alunecare [m/s]	Raza de încercare [mm]	Lungimea de încercare [m]	Timpul de încercare [min]
3,92	25	2000	8,5

Caracteristicile masice și dimensionale ale discului din fontă și a pinilor din material compozit la începutul și sfârșitul experimentărilor se prezintă în tabelul 7.6.

Tabelul 7.6

Caracteristicile dimensionale ale epruvetelor

Nr. crt.	Nr. epruvetă	Masa inițială a epruvetei m_0 [g]	Masa finală a epruvetei m_f [g]	Înălțimea inițială a epruvetei l_i [mm]	Înălțimea finală a epruvetei l_f [mm]
1.	Fontă S1	50,8934	50,6214	-	-
2.	C1	7,8657	6,3243	27,5	18,4
3.	C2	7,2317	6,7532	26,4	17,8

Parametrii de uzare pentru proba din fontă și probele din material compozit se prezintă în tabelul 7.7.

Tabelul 7.7

Parametrii de uzare pentru proba de fontă și pinii din material compozit

Nr. crt.	Nr. epruvetă	Uzura masică $u = m_0 - m_f$ [g]	Intensitate de uzare $I = u / L$ [g/m]	Durabilitatea relativă la uzare $U_r = u_{fontă} / u_{compozit}$
1.	Fontă S1	0,272	0.000136	-
2.	C1	1,5414	0.0007707	0,1764
3.	C2	0,4785	0,0002394	0,1839

Analizând tabelul 7.7 se observă că cea mai mare intensitate de uzare s-a obținut pentru compozitul C1. Deasemenea, cea mai mare durabilitatea relativă de uzare s-a obținut pentru compozitul C2. În timpul experimentărilor, proba C2 a fost cronometrată și cântărită la timpi și lungimi pe parcurs intermediare, valorile obținute fiind prezentate sub formă tabelară și grafică [158], rezultatele fiind prezentate în tabelul 7.8.

Tabelul 7.8

Rezultate experimentale privind variația masei și a înălțimii epruvetei C2

Timpul [min]	Lungimea Parcursă L [m]	Masa [g]	Reducere de greutate absolută, [g]	Reducerea de greutate relativă, [%]	Înălțime [mm]	Reducere de înălțime absolută	Reducere de înălțime relativă
0	0	7,2317	0	0	26,4	0	0
2,12	500	6,7323	0,4994	6,9057	23,1	3,30	12,5
4,25	1000	6,0819	1,1498	15,8994	21,0	5,40	20,45
6,37	1500	5,9122	1,3195	18,2460	19,4	7,04	26,66
8,5	2000	5,7532	1,4785	20,4447	17,8	8,60	32,57

În vederea stabilirii unor ecuații de corelație simplă, rezultatele prezentate în tabelul 7.8 au fost prelucrate în programul de calcul Excel, graficele fiind prezentate în fig.7.9-7.11.

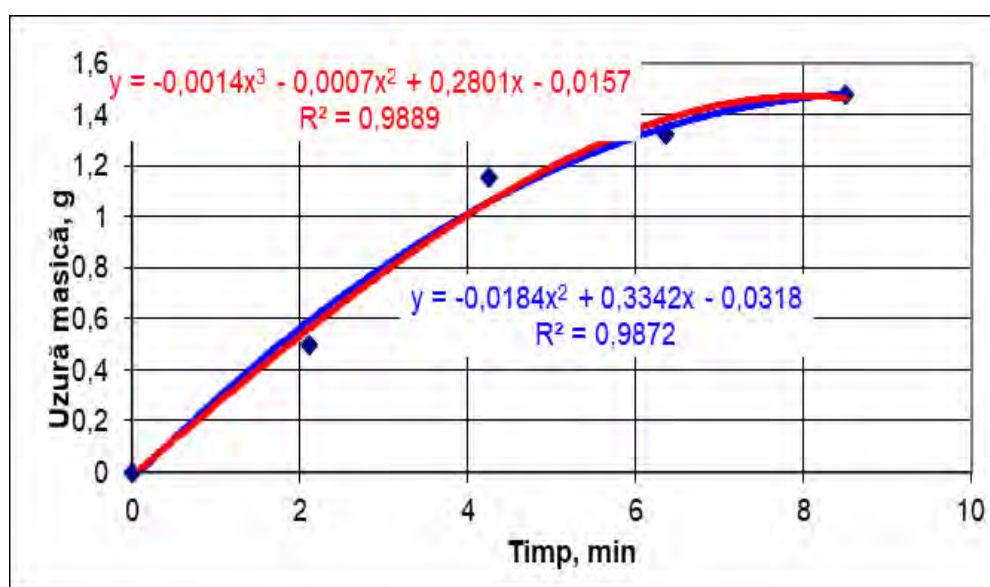


Fig.7.9 Uzura masică pentru epruveta C2

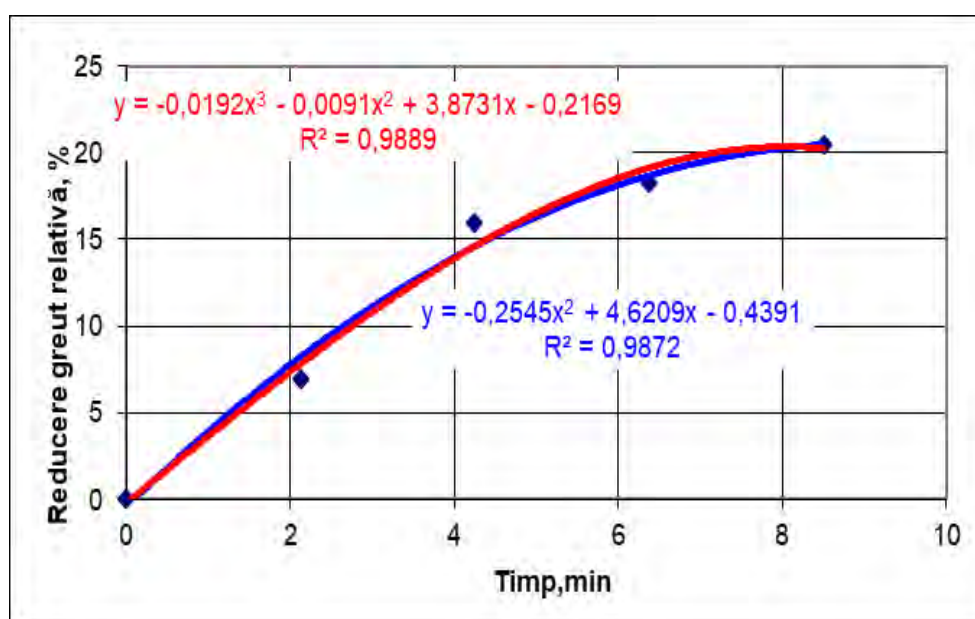


Fig.7.10 Reducerea de greutate relativă pentru epruveta C2

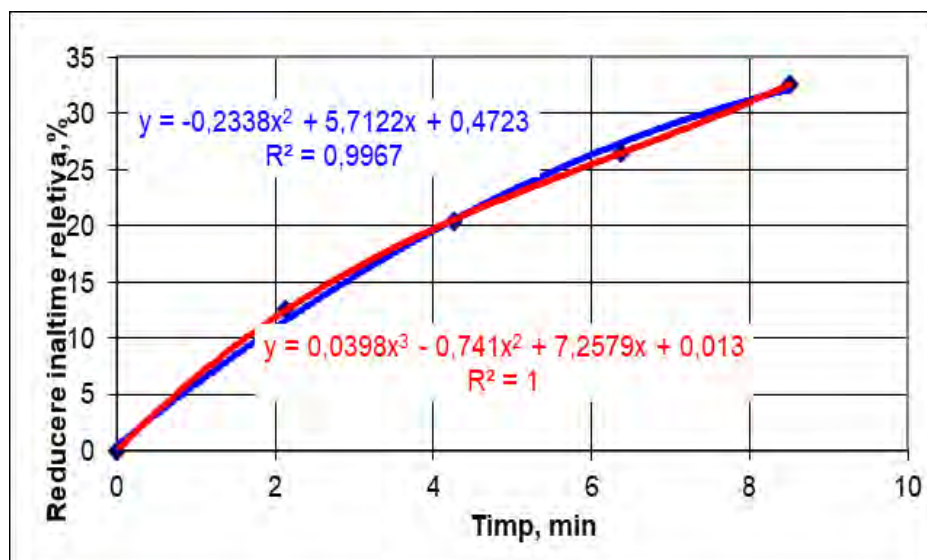


Fig.7.11 Reducerea de înălțime relativă pentru epruveta C2

Analizând graficele prezentate în fig.7.9-7.11 se observă că s-au obținut rezultate semnificative din punct de vedere al coeficienților de corelație [158].

În continuare s-a analizat evoluția câmpului termic în zona de contact a cuplelor de frecare (disc fontă-pin compozit organic). În acest scop a fost utilizată o cameră de termografiere marca FLIR “Therma CAM Quick View” care a permis captarea imaginilor de la distanță [58,71,148,158]. În tabelul 7.9 se prezintă temperatura acumulată în pini pentru fiecare forță de apăsare considerată.

Tabel 7.9

Temperatura acumulată în pini pe parcursul experimentului

Forța de apăsare [N]	Temperatura [°C]		Lungimea de testare [m]	Timpul de testare [min]
	C1 5% cocos	C2 10 % cocos		
5	40,1	60,4	500	2,12
	43,8	74,3	1000	4,25
	42,7	74,8	1500	6,37
	40,9	61,1	2000	8,50
10	47,3	64,8	500	2,12
	56,2	75,8	1000	4,25
	59,9	76,1	1500	6,37
	59,2	74,8	2000	8,50
15	58,9	75,1	500	2,12
	62,6	82,3	1000	4,25
	85,9	89,7	1500	6,37
	81,2	88,8	2000	8,50

În fig. 7.12 se prezintă temperatura în zona de contact dintre cuplele aflate în frecare pentru pinul realizat cu 5 % fibră de cocos la sfârșitul experimentelor cu forțele de apăsare de 5N, 10N, respectiv 15N.

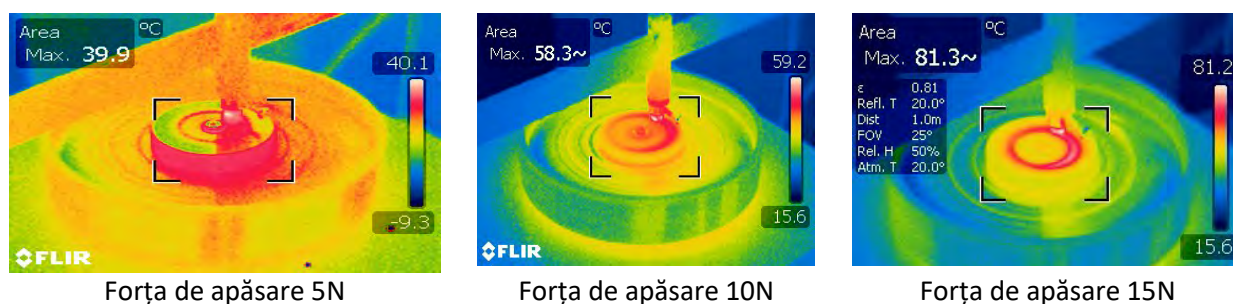


Fig.7.12 Temperatura în zona de contact la sfârșitul experimentărilor pentru pinul realizat cu 5 % fibră de nucă de cocos (C1)

În fig. 7.13 se prezintă temperatura în zona de contact dintre cuplele aflate în frecare pentru pinul realizat cu 10 % fibră de cocos la sfârșitul experimentelor cu forțele de apăsare de 5N, 10N, respectiv 15N.

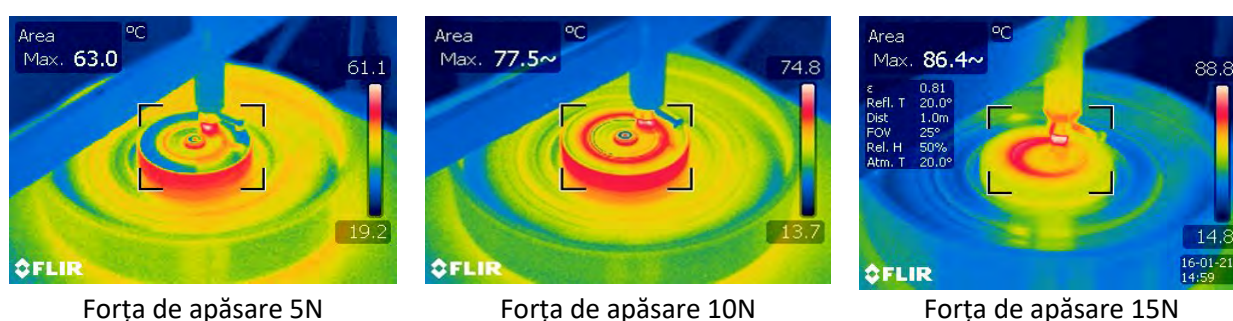


Fig.7.13 Temperatura în zona de contact la sfârșitul experimentărilor pentru pinul realizat cu 10 % fibră de nucă de cocos (C2)

Analizând rezultatele din tabelul 7.9 se observă că:

- la acțiunea forței $F=5N$ în intervalul 0-500m, temperatura în pinul C2 crește mai repede decât în C1;
- în intervalul 500-1000m, temperatura în cei doi pini crește mai puțin, iar în intervalul 1000-1500m, creșterea de temperatură este relativ mică;
- peste 1500 m, temperatura în cei doi pini a început să scadă, scăderea de temperatură fiind mai mare în pinul C2;
- la creșterea forțelor de încărcare se observă că se păstrează aceeași tendință de creștere rapidă în intervalul 0-500m, urmată de o stabilizare a temperaturii în intervalul 500-1500m, iar peste 1500m temperatura începe să scadă;
- în toate cele trei variante de încărcare, pinul realizat după rețeta C1, care conține 5% fibră de nucă de cocos, a acumulat o cantitate mai mare de căldură;
- din punct de vedere al evoluției câmpului termic, cea mai bună comportare a avut-o pinul realizat cu 10% fibră de nucă de cocos (C2).

Determinarea evoluției coeficientului de frecare pentru materialele compozite produse în laborator s-a efectuat pe un tribometru TR-20 a cărui principiu de funcționare are la bază metoda „pin pe disc”. Pinul echipamentului este o bilă din oțel cu diametrul de 6 mm, iar regimul de frecare folosit pentru testare este cel de frecare uscată. Epruvetele din materialele compozite au fost realizate sub formă paralelipipedică cu dimensiunile 30x30x20mm. Acestea au fost supuse curățirii cu alcool, apoi uscate și cântărite cu o balanță digitală cu precizia de $\pm 0,01$ mg. S-au realizat trei cântăriri succesive luând în calcul media acestora. În cadrul testului s-au realizat determinări pentru trei forțe de apăsare diferite (5N, 10N, și 15N), la fiecare testare cântărindu-se probele înainte și după efectuarea testării, în vederea determinării uzurii masice. Parametrii din cadrul experimentului sunt prezentați în tabelul 7.10.

Tabelul 7.10

Parametrii de determinare a coeficientului de frecare

Diametrul urmei de uzare [mm]	Turația [rot/min]	Timpul de testare [h]	Distanța de testare [m]
25	150	5	2200

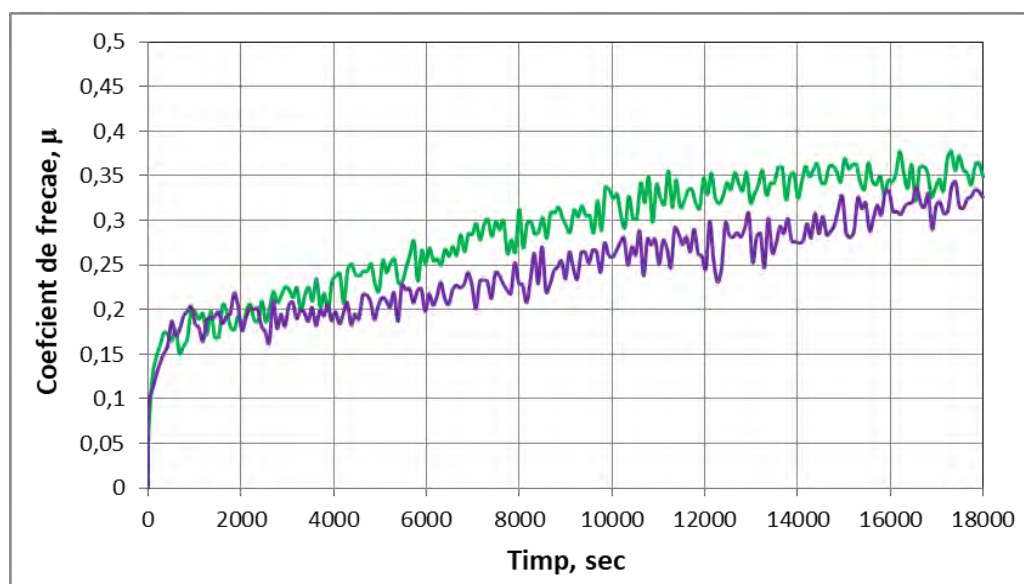
Datele experimentale pentru cele trei valori ale sarcinilor de încercare obținute în fișier text din soft-ul computerului tribometrului sunt prezentate în tabelul 7.11.

Tabelul 7.11

Coeficientul de frecare și uzura probelor pentru cele trei sarcini de încărcare

Probe	Coeficient de frecare			Uzură [g]		
	$F_1 = 5\text{ N}$	$F_2 = 10\text{ N}$	$F_3 = 15\text{ N}$	$F_1 = 5\text{ N}$	$F_2 = 10\text{ N}$	$F_3 = 15\text{ N}$
C1	0,43	0,33	0,30	0,19	0,15	0,13
C2	0,50	0,45	0,39	0,07	0,05	0,03

La sarcini de apăsare mici, coeficienții de frecare au valori mari. Pe măsură ce sarcina de lucru crește, valorile coeficienților de frecare scad. Pe parcursul experimentelor, coeficienții de frecare pentru ambele compozite se mențin între valorile 0,3 și 0,5. Evoluția coeficienților de frecare pentru forța de apăsare de 10 N pentru cele două materiale compozite testate se prezintă în fig. 7.14, [150,160].

Fig. 7.14 Evoluția coeficienților de frecare, $F = 15\text{ N}$

Funcționarea fiecărei probe este asociată cu o creștere lentă a coeficientului de frecare. La începutul încercărilor, coeficientul de frecare variază ca urmare a contactului discontinuu între bila de oțel și proba de material compozit, însă valoarea acestuia se stabilizează până la sfârșitul experimentelor, după 18000s, [153,158-160].

În general, plăcuțele de frână cu coeficient ridicat de frecare asigură o frânare mai bună și un efort mai redus din partea conducătorului auto la apăsarea pedalei de frână.

Literatura de specialitate precizează valori ale coeficienților de frecare pentru materiale de fricțiune cuprinse într-o gamă destul de largă de valori 0,15 la 0,6. Practic, pentru majoritatea vehiculelor valorile nominale ale coeficienților de frecare variază între limitele 0,3-0,6 [94]. Valorile obținute pentru coeficienții de frecare în experimentele efectuate confirmă literatura de specialitate. Conținutul mai mare de fibre de nucă de cocos din compozitul C2 a dus la o performanță mai bună la frecare și la obținerea unui coeficient de frecare mai mare, [150-153].

În fig. 7.15 s-a studiat influența forței de apăsare asupra coeficientului de frecare, iar în fig. 7.16 influența forței de apăsare asupra uzurii probelor.

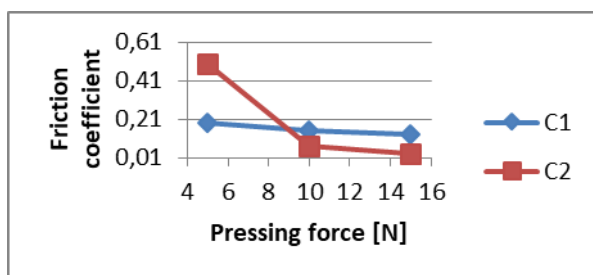


Fig.7.15 Influența forței de apăsare asupra coeficientului de frecare

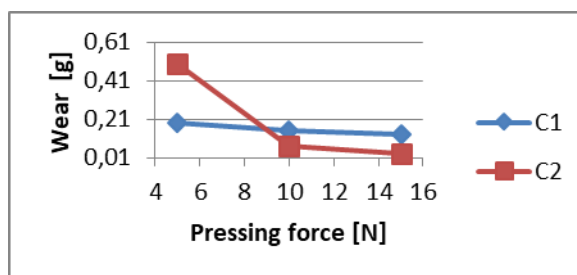


Fig.7.16 Influența forței de apăsare asupra uzurii probelor

Din fig.7.15 se observă scăderea coeficienților de frecare odată cu creșterea forței de apăsare, iar din fig.7.16 se observă că uzura scade cu creșterea forței de apăsare.

Materialele compozite testate în laborator au densitate și porozitate scăzută, proprietăți de duritate ridicată și rezistență ridicată la compresiune, care le fac utile în industria auto. Integritatea structurală a materialelor a asigurat caracteristici fizico-mecanice superioare, iar coeficientul de frecare se stabilizează după un anumit interval de timp. Factorii care au determinat obținerea unor caracteristici fizice și mecanice sunt: tipul de componente alese în rețete, optimizarea proporției componentelor și parametri tehnologiei de sinterizare. Pentru compozitul C2 valoarea coeficientului de frecare s-a stabilizat la 0,35, iar materialul de frecare poate fi utilizat pentru vehicule mici și performanțe medii.

Cea mai mare rezistență la uzură o are epruveta realizată cu 10% fibră de nucă de cocos. În ceea ce privește uzura discului din fontă, acesta este mult mai mică decât uzura materialelor compozite, ceea ce arată că rezistența la uzare nu depinde foarte mult de cantitatea părții metalice acest lucru fiind foarte important pentru situația practică deoarece plăcuțele de frână se înlocuiesc mai ușor decât discul [58,150,153,154,157,158]. Cele mai bune caracteristici tribologice le are proba C2 realizată cu 10% fibră organică.

Având în vedere concluziile obținute, materialul de fricțiune cu cele mai bune caracteristici fizico-mecanice și tribologice (C2 cu 10% fibră de nucă de cocos) va fi testat în condiții de laborator la frânări intensive.

7.3.3 Testarea în laborator a materialelor de fricțiune

În vederea testării în laborator a materialului organic produs în laborator s-a conceput și realizat o instalație experimentală prezentată în lucrarea [146]. Instalația permite testarea materialului de fricțiune organic la frânări suscesive. Instalația are în componența ei următoarele elemente componente: motor electric, reductor, transmisie prin curele, pompă de vacuum, arbore planetar, fuzetă, pivot, disc de frână. Ansamblul general al instalației se prezintă în fig.7.17, [146,154,158].



Fig.7.17 Ansamblul general al instalației experimentale pentru testarea materialelor de fricțiune la frânări intensive

Motorul electric din componența instalației experimentale este de curent continuu cu perii, cu puterea de 2,2 kW și o turație de 2950 rot/min, iar reductorul de turație este cu o treaptă. Ansamblul instalației mai cuprinde o pompă de vacuum cu membrană, tip 14 AG 08, cu turația maximă de 5000/min și depresiunea maximă de -77,2 kPa. Antrenarea pompei de vacuum se realizează printr-o transmisie prin curele trapezoidale, care face legătura dintre roata de curea a pompei de vacuum și roata de curea de pe arborele planetar al instalației. Roata de curea conducătoare a fost fixată de arborele planetar printr-un montaj nedemontabil, iar roata de curea condusă este fixată de mecanismul pompei de vacuum prin șuruburi. Transmisia mecanică mai cuprinde două cuplaje, unul care face legătura între motorul electric și reductor, iar celălalt care face legătura între arborele de ieșire din reductor și arborele planetar. Variatorul de turație permite modificarea turațiilor de la 0 la 200 rot/min, pe baza modificării tensiunii primite.

Principiul determinărilor experimentale presupune efectuarea a zece frânări succesive, măsurându-se temperatura la fiecare frânare cu o cameră de termografieră. Conform literaturii de specialitate temperatura după cele zece frânări succesive trebuie să fie mai mică de $\tau_s \leq 300^\circ \text{C}$, [94,148,158,160].

Instalația experimentală a primit medalia de aur la Expoziția Internațională INVENTCOR 2020 care a avut loc în 17-19 decembrie la Deva și Diploma de excelență la salonul EUROINVENT 2021, care a avut loc în 20-22 mai la Iași.

În vederea determinărilor experimentale au fost realizate plăcuțe de frână din materialul de frecare produs în laborator (cu 10% fibră de nucă de cocos), care au fost montate în instalația experimentală. În fig.7.18 se prezintă dimensiunile discului de frână utilizat în instalația experimentală, iar în fig.7.19 se prezintă suportul metalic și proba din material compozit. Experimentul analizează și evoluția câmpului termic în zona de contact a cuplelor de frecare (fontă-material de frecare organic).

În tabelul 7.12 se prezintă temperaturile din zona de contact la fiecare frânare, iar în fig.7.20 sunt prezentate câmpurile termice din zona de contact în timpul unor frânări din timpul determinărilor experimentale.

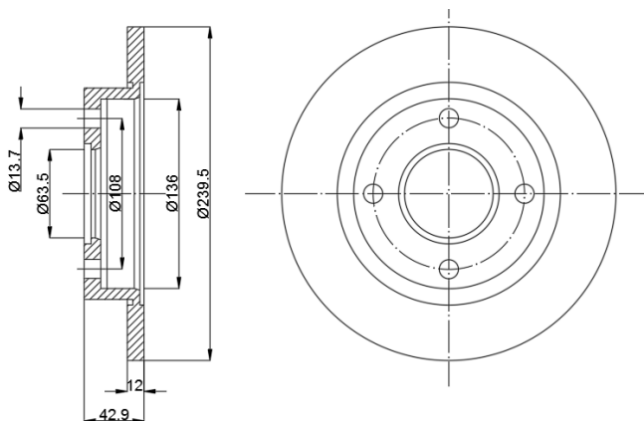


Fig. 7.18 Dimensiunile discului de frână din instalația experimentală



Fig.7.19 Suportul metalic și proba din material compozit

Tabelul 7.12

Valorile temperaturilor din timpul frânărilor succesive

Temperatura inițială τ_0 [°C]	Forța la pedală [N]	Temperatura din timpul frânărilor τ [°C]									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	120	18	20,4	36,6	62,7	77,8	133,6	149	245	255	206

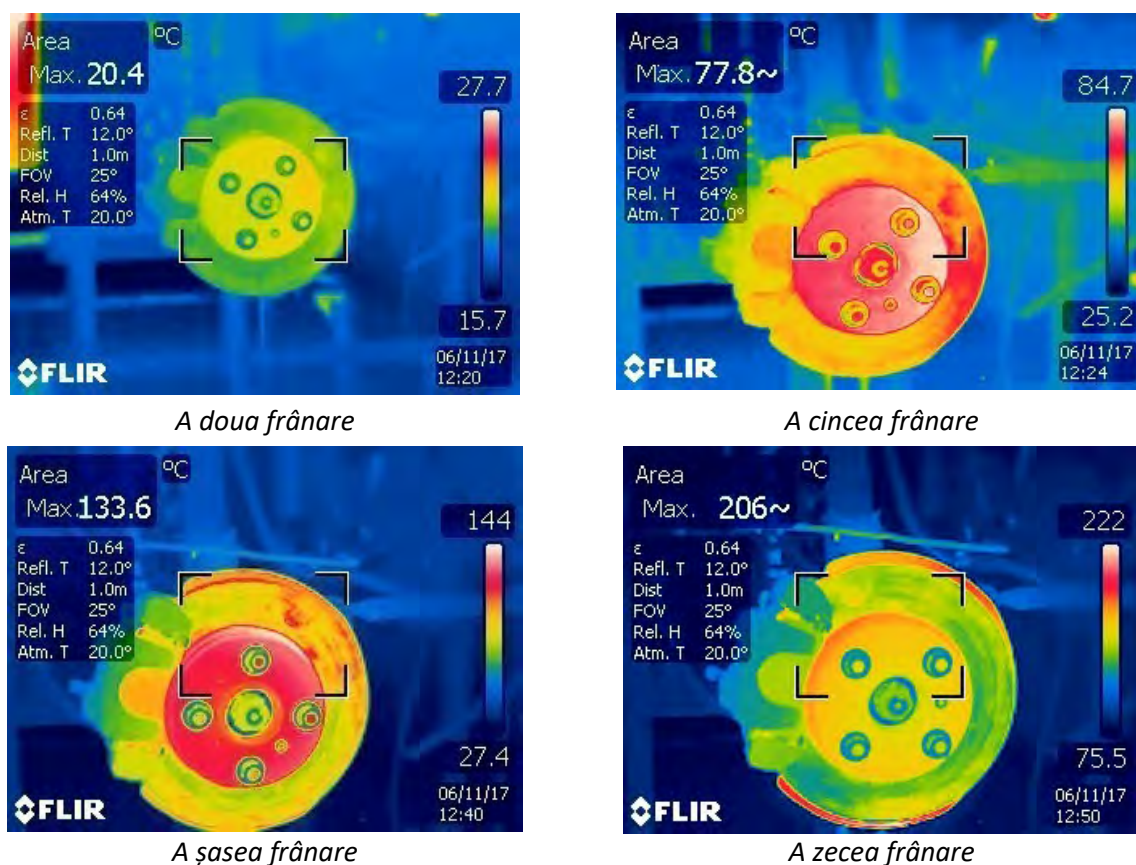


Fig.7.20 Evoluția câmpului termic în zona de contact dintre discul și plăcuța de frână

Din tabelul 7.12 se observă că temperatura în zona de contact a cuplelor aflate în frecare crește rapid până la a opta frânare când temperatura ajunge la 245°C, după care, la frânarea următoare creșterea este de doar 10°C, urmând ca la cea de a zecea frânare temperatura să scadă la 206°C. Acest lucru se explică prin faptul că o parte din căldura rezultată se acumulează în plăcuțele de frână și se transmite mediului exterior. Dacă temperatura în zona de contact este mai mică, degradarea componentelor organice din materialele compozite este mai mică. De asemenea, se observă că temperatura în timpul experimentărilor nu depășește 300°C, ceea ce respectă recomandările din literatura de specialitate, [94].

La demontarea plăcuței de frână din ansamblul instalației experimentale, s-a observat că în timpul frânării, contactul disc-plăcuță a fost de aproximativ 80%, aceasta confirmând normele ECE R90, fig.7.21, [94].



Fig.7.21 Suprafața de contact a plăcuței de frână după efectuarea frânărilor succesive

În continuare, se evaluează gradul de degradare a materialului din plăcuța de frână supusă uzurii în instalația experimentală. Pentru analiza stratului superficial s-a folosit analiza SEM cu un sistem EDS de tip Inspect S. Figurile 7.22 și 7.23 prezintă imaginile SEM ale plăcuței de frână înainte de începerea experimentărilor, respectiv după finalizarea acestora.

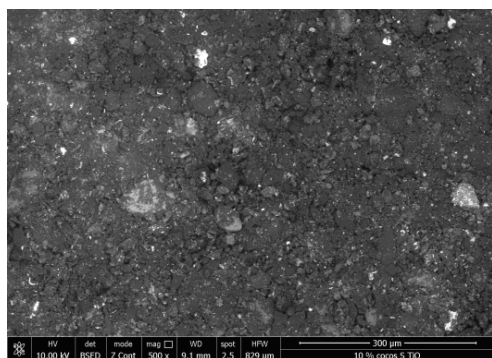


Fig.7.22 Structura plăcuței de frână înaintea determinărilor experimentale

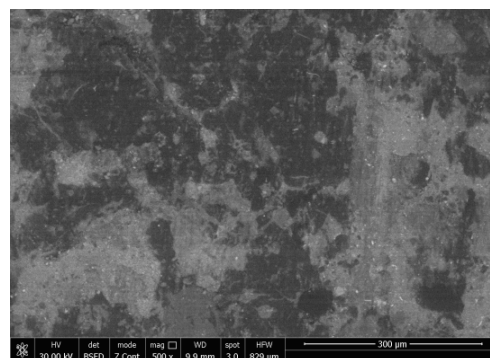


Fig.7.23 Structura plăcuței de frână după determinările experimentale

Din fig.7.22 se poate observa că microstructura materialului de fricțiune are o distribuție omogenă, ceea ce presupune o concentrație procentuală adecvată între matrice și volumul de armătură. Imaginile SEM, din fig.7.23 arată urmele de uzură obținute pe suprafața plăcuței de frână la sfârșitul experimentelor. Se pot observa goluri în masa compozitului ca urmare a răcirii rapide a masei nemetalice în contact cu masa metalică. Uzura abrazivă poate fi observată datorită eliminării particulelor de uzură care mențin particulele de metal în structura probei realizată cu 10% fibră de nucă de cocos supusă la frânări succesive, [153].

În concluzie, fibra naturală de nucă de cocos a avut un comportament adecvat și poate fi folosită ca material de umplutură pentru producerea plăcuțelor de frână destinate autovehiculelor mici și performanțe medii. Inconvenientul materialului organic este însă costul fibrei, nuca de cocos fiind un fruct exotic, [58,153].

7.3.4 Testarea plăcuțelor de frână produse în laborator într-o stație ITP

Obiectivul principal al acestui subcapitol este de a evalua performanța de frânare a plăcuțelor de frână produse în laborator din material organic cu fibră de nucă de cocos. În acest sens am comparat două materiale de frecare destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehiculele mici și performanțe medii. Testele de frânare au fost efectuate pe un autovehicul cu motor cu aprindere prin scânteie și două variante de echiparea a sistemului de frânare pentru puntea față, [154]:

- discuri de frână ventilate, din fontă și plăcuțe de frână din material semimetalic, omologate conform standardelor ECE R90;
- discuri de frână ventilate, din fontă și plăcuțe de frână din material compozit cu fibră de nucă de cocos, produse în laborator.

Pentru determinarea performanțelor de frânare a plăcuțelor de frână realizate din material compozit cu fibră de nucă de cocos produs în laborator, s-a ales un autovehicul cu puterea de 140 CP. Testarea s-a realizat pe o instalație, Smart Jumbo RBT, dintr-o stație pentru Inspecții Tehnice Periodice. Aceasta permite măsurarea parametrilor de frânare ai vehiculelor și camioanelor cu o sarcină maximă pe osie de până la 160 000 N și lucrează cu software-ul WINJumbo, rezultatele fiind stocate într-o bază de date, [160].

Plăcuțele de frână semimetalice au fost achiziționate de pe piața pieselor de schimb. Materialul de frecare din care acestea sunt realizate este ecologic, fără azbest, cu o eficiență bună la frânare, caracteristici bune de uzură și o rezistență ridicată a aderenței materialului de frecare la suportul metalic pe întreg intervalul temperaturilor de lucru. Materialul de frecare constă din fibre minerale, materiale pulverulente anorganice, rășină fenol-formaldehidă și pulbere de cauciuc sintetic. Toate aceste date sunt conforme cu fișa tehnică a plăcuțelor de frână semimetalice, [82]. Aceasta specifică doar componentele rețetei utilizate în producerea materialului de fricțiune fără a menționa concentrațiile acestora, acesta fiind un secret al producătorului, la fel ca și parametri tehnologiei de sinterizare, [160].

În fig.7.24 se prezintă materialul organic și suportul metalic pe care acesta va fi lipit. Fig.7.25 prezintă amplasarea plăcuță de frână din material organic în ansamblul punții față, iar fig.7.26 prezintă vehiculul poziționat pe rolele stației de testare.



Fig.7.24 Material de frecare și suport metalic pentru realizarea plăcuței de frână



Fig.7.25 Amplasarea plăcuței pe discul de frână



Fig.7.26 Poziționarea roților punții față pe rolele instalației de testare

Etapile parcurse pentru determinarea performanței la frânare sunt: poziționarea vehiculului cu roțile punții față pe rolele instalației, pornirea software-ului instalației, inițializarea parametrilor specifici vehiculului, crearea bazei de date necesară pentru testarea vehiculului, calibrarea senzorilor și verificarea funcționalității acestora, pornirea meniului pentru determinarea distribuției greutății pe osiile vehiculului, determinarea rezistenței la rularea vehiculului, determinarea performanței sistemului de frânare, [160].

La sfârșitul testelor, software-ul utilizat de instalația de testare afișează rezultatele sub formă grafică și sub formă de raport tehnic. În timpul testelor a fost evidențiată distribuția câmpului de temperaturi prin termografiere. Astfel, s-au urmărit variațiile de temperaturi pentru discul și plăcuța de frână, precum și temperatura din zona de contact dintre cele două componente. Testele urmăresc cunoașterea temperaturilor între două frânări intensive precum și temperatura discurilor și a plăcuțelor de frână la finalul încercărilor. În ceea ce privește testele, a fost necesar să se cunoască temperatura ambiantă și umiditatea aerului, precum și variația emisivității materialului cu temperatura, toate aceste informații fiind furnizate de camera de termografiere, [160].

În vederea efectuării testelor, vehiculul a fost poziționat pe rolele instalației de testare cu roțile punții față, după care s-a determinat performanța la frânare, succesiv pentru cele două variante de echipare a punții față. Graficul de variație al forței de frânare în prima variantă de echipare se prezintă în fig.7.27. În vederea efectuării încercărilor pentru cea de-a doua variantă, plăcuțele de frână semimetalice au fost înlocuite cu plăcuțele realizate din material de fricțiune cu fibră de nucă de cocos. Graficul de variație al forței de frânare pentru puntea față în a doua variantă se prezintă în fig.7.28, [160].



Fig.7.27 Graficul de variație a forței de frânare pentru puntea față în varianta 1

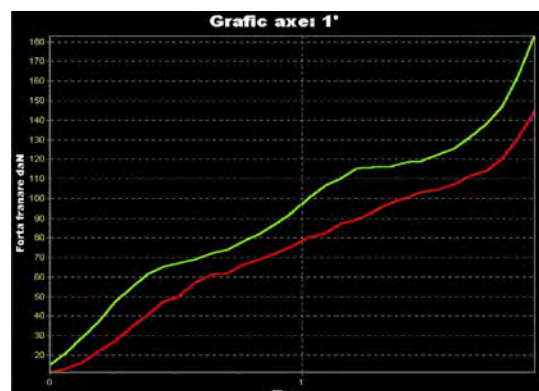


Fig.7.28 Graficul de variație a forței de frânare pentru puntea față în varianta 2

Analizând graficele de variație a forței de frânare pentru cele două variante studiate se observă un comportament aproximativ identic. Diferențele mici existente între cele două grafice sunt explicate

prin elementele geometrice diferite ale celor două plăcuțe de frână, precum și prin natura materialului de fricțiune, [160].

La finalul încercărilor, raportul tehnic prezintă valorile forțelor de frânare, ale capacității de frânare și dezechilibrele dintre forțele de frânare ale roților de pe aceeași axă, tabelul 7.13. Pentru ambele variante, rezultatul testului de frânare este pozitiv, ceea ce înseamnă că valorile obținute se încadrează în limitele admisibile, valorile stabilite de normele în vigoare, [94].

Tabelul 7.13

Parametrii capacității de frânare

Greutate totală autovehicul [N]	Forța de frânare [N]				Capacitatea de frânare [%]			Dezechil. dintre forțele de frânare [%]		
	Varianta 1		Varianta 2		Var. 1	Var.2	RNTR Min.	Var. 1	Var.2	RNTR Max.
	Stânga	Dreapta	Stânga	Dreapta						
1107	2900	2191	2731	2021	64	63	50	25	20	30

Pentru prima variantă de echipare a punții față, în fig.7.29 se prezintă temperatura discului de frână la începutul testelor, iar fig.7.30, respectiv fig.7.31 temperatura discului, respectiv a plăcuțelor de frână la finalul testului. În fig.7.30 se poate observa că la finalul testului, temperatura acumulată de discul de frână a fost de 88,3° C, iar fig.7.31 arată că temperatura plăcuțelor de frână a fost de 62,3° C. În concluzie, cea mai mare parte a căldurii s-a acumulat în discul de frână. Testele au fost realizate la 6°C, umiditatea 64% și coeficientul de emisivitate este 0,64, [160].

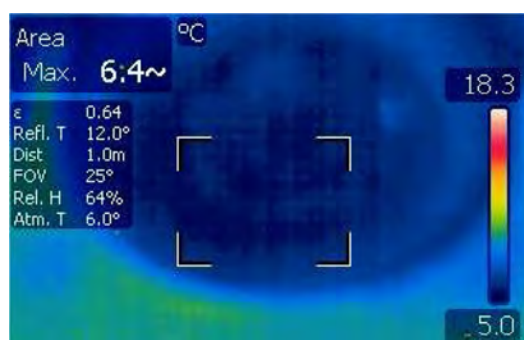


Fig.7.29 Temperatura discului de frână la începutul testelor

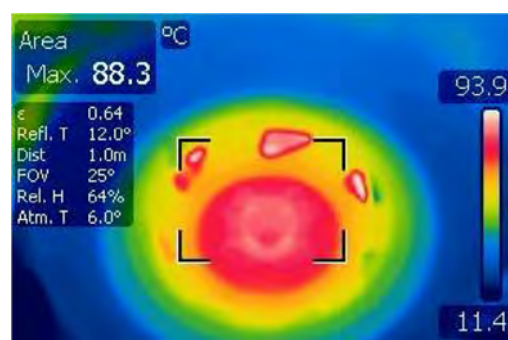


Fig. 7.30 Temperatura discului de frână la finalul testelor

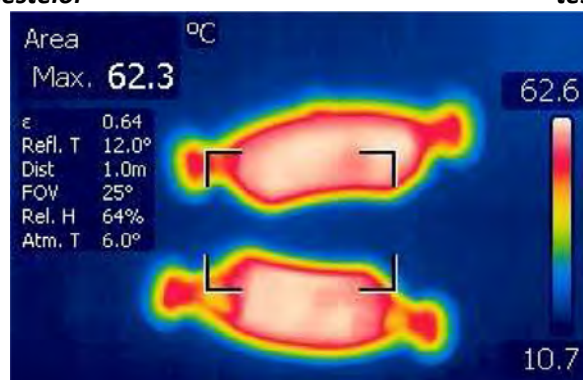


Fig. 7.31 Temperatura plăcuțelor de frână din material semimetalic la finalul testelor

Pentru cea de a doua variantă de echipare a punții față, în fig.7.32 se prezintă temperatura discului de frână la sfârșitul testării, iar în fig.7.33 temperatura plăcuței de frână din material compozit.

Intervalele în care s-a efectuat testarea în ambele variante sunt aproximativ egale. La sfârșitul testelor, temperatura acumulată de discul de frână a fost 76,9°C, iar temperatura plăcuțelor de frână a fost de 59,2°C. Temperatura discului de frână la finalul testelor în varianta 2 este mai mică cu aproximativ 12°C comparativ cu varianta 1. Aceasta arată că solicitarea termică a discului de frână în această variantă este mai mică. Temperatura plăcuței de frână din material compozit este mai mică cu aproximativ 3° C față de temperatura finală a plăcuței semimetalice. Cantitatea de căldură eliberată în

timpul frânării în mediul extern este mai mare în cazul plăcuței realizată din material compozit cu fibră de nucă de cocos, [160].

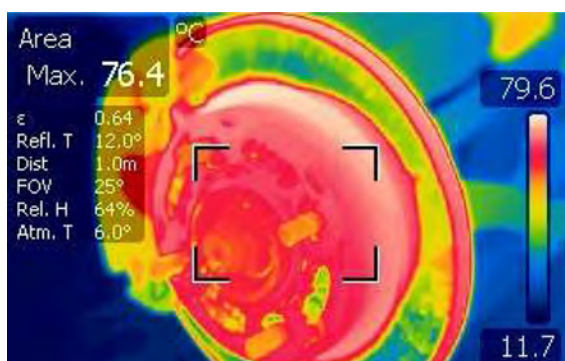


Fig.7.32 Temperatura discului de frână la testelor în varianta 2

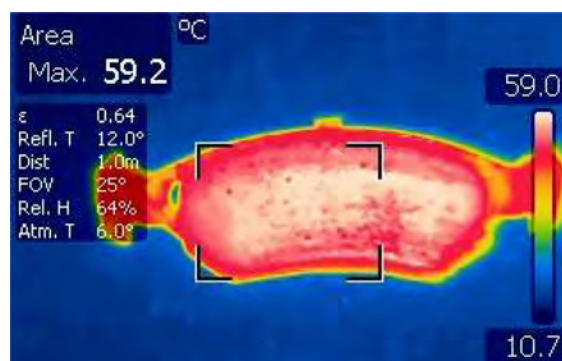


Fig.7.33 Temperatura plăcuței de frână din material compozit la finalul testelor

În fig.7.34 se prezintă rezultatele comparative privind distribuția radială a temperaturilor pe suprafața discurilor de frână în cele două variante analizate. Urmărirea acestor distribuții s-a realizat prin prelucrarea datelor obținute cu camera de termoviziune și folosind programul Excel. În această figură se poate observa că distribuția temperaturii în direcție radială are aspect similar pentru cele două variante analizate. Acest lucru se datorează faptului că testele au fost efectuate pe același vehicul și folosind aceleași discuri de frână, din punct de vedere al materialului și al geometriei. Importanța cunoașterii variației temperaturilor în direcție radială este utilă deoarece, în timp, acestea pot duce la modificări ale structurii materialului, prin apariția de puncte fierbinți care se pot amplifica și generează zgomote și vibrații, [160].

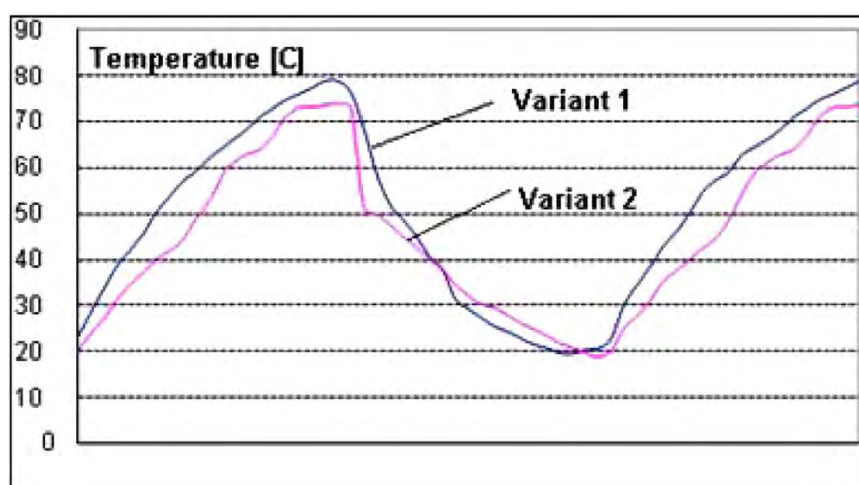


Fig. 7.34 Distribuția radială a temperaturii pentru discurile de frână

Ca urmare a testelor efectuate pentru determinarea performanței la frânare, s-a constatat că plăcuțele de frână produse în laborator din material compozit cu fibră de nucă de cocos au un comportament adecvat și pot lucra în condiții reale de funcționare.

Condițiile și parametrii de încercare ai instalației nu pot însă simula exact toate condițiile de testare pe drum. Validarea finală a rețetei se bazează pe rezultatele performanței rutiere. Totuși, pentru ca plăcuțele de frână produse în laborator să poată fi supuse testelor de performanță rutieră sunt necesare încercări preliminare pentru a se constata dacă materialul de frecare poate funcționa în condiții reale de rulare a autovehiculului. Testul final de validare al rețetei materialului de fricțiune produs în laborator se va realiza prin determinarea parametrilor capacității de frânare ai autovehiculului echipat cu plăcuțe cu fibră de nucă de cocos la rulare în condiții de drum, dar aceste teste vor face obiectul unei alte lucrări, [160].

7.4 Producerea și caracterizarea materialelor organice pe bază de scoici

Tot pe această direcție de cercetare am abordat ideea schimbării materialului organic în vederea producerii materialelor de fricțiune destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehiculele mici și performanțe medii. În acest scop am ales pulberea obținută din cochiliile scoicilor marine.

7.4.1 Materiale și tehnologie

În abordarea cercetării am ales specia de scoici *Monodacna colorata* care se găsește în Bazinul Pontic, iar în România trăiește în complexul Razim, fig.7.35, [159].



Fig.7.35 Scoici *Monodacna colorata*



Fig.7.36 Pulbere de scoici

Această specie de scoici are cochilia ușor alungită, ovală, subțire, relativ fragilă, cu marginile anterioară și posterioară aproape egale, cu o lungime de 30-40 mm și o lățime de 25-30 mm, [159].

Materialele utilizate în rețetă sunt: pulberea din cochiliile de scoici, rășina fenolică, grafitul, hexametyltetramină, metal și carbura de siliciu, [157,159]. În vederea caracterizării pulberii scoicilor s-a realizat o analiză a compoziției chimice a acestora, tabelul 7.14, [159].

Tabelul 7.14

Compoziția chimică a scoicilor

Element	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	Cl	S	MnO	K ₂ O	ZnO
[%]	80,3	8.98	3,2	2,8	1,3	0,768	0,543	0,638	0,530	0,277	0,664

În cadrul acestui subcapitol se prezintă trei rețete diferite, din fiecare rețetă fiind realizate epruvete (proba A, proba B și proba C) cu conținut variabil de pulbere din cochilii de scoici și metal, tabelul 7.15.

Materiile prime au fost pregătite sub formă de pulbere. Scoicile au fost introduse într-un concasor care a redus dimensiunea cochilelor până la 3-4 mm, iar apoi încărcătura a fost introdusă într-o moară cu bile care a dus la obținerea unor particule cu dimensiuni sub 1 mm. Produsul astfel obținut a fost transferat într-un set de site care a permis sortarea. În fig.7.36 se prezintă pulberea de scoici utilizată în procesul de sinterizare, [159].

Tabelul 7.15

Compoziția chimică a materialelor

Compoziție	Proba A	Proba B	Proba C
Scoici	40	45	50
Metal	25	20	15
Carbură de siliciu	4	4	4
Grafit	5	5	5
Hexametyltetramină	6	6	6
Rășină fenolică	20	20	20

Materiile sub formă de pulbere au fost amestecate împreună timp de 25 min după care s-a adăugat hexametyltetramina amestecându-se încă 5 min, după care mixul obținut s-a introdus peste

rășina fenolică și s-a mai amestecat încă 10 min. Amestecul astfel obținut s-a introdus într-o matriță circulară cu diametrul de 95mm, realizându-se strângerea pistonului acesteia și presarea materialului. Pentru extragerea probei din matriță s-au luat măsuri împotriva lipirii materialului de partea inferioară a matriței și suprafața activă a pistonului acesteia. Astfel, pe aceste suprafețe s-a așezat un strat de folie de aluminiu și s-a distribuit un strat subțire de grafit, [157,158].

În vederea compactării materialului acesta va fi supus presării, care s-a realizat în două etape, respectiv la rece și la cald, pe o presă hidraulică PH 40. Parametrii tehnologiei de sinterizare se prezintă în tabelul 7.16.

Tabelul 7.16

Parametrii tehnologiei de sinterizare

Presare la rece	Condiții cuptor		Presare la cald	Condiții cuptor		Răcire	
	Temp. încălzire [°C]	Timp menținere [min]		Temp. încălzire [°C]	Timp menținere [min]	Mediu	Timp [min]
Presiune KN/cm ²			Presiune KN/cm ²				
75	150	15	100	110	300	Aer	720

În fig.7.37 se prezintă probele obținute după cele trei rețete la finalul procesului de sinterizare. Acestea au fost analizate din punct de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice, în acest sens fiind prelevate epruvete din fiecare material compozit produs, în concordanță cu standardele în vigoare, [94].



Proba A



Proba B



Proba C

Fig.7.37 Probele obținute la sfârșitul procesului de sinterizare**7.4.2 Determinarea caracteristicilor fizico-mecanice și tribologice**

Caracteristicile fizico-mecanice ale materialelor compozite produse după cele trei rețete se prezintă în tabelul 7.17.

Tabelul 7.17

Caracteristicile fizico-mecanice ale materialului de fricțiune

Proba	Densitate [g/cm ³]	Porozitate în ulei [%]	Duritate HRB	Forța de rupere [N]	Modulul lui Young [N/mm ²]	Forța de compresiune [N/mm ²]
A	2,55	0,85	40	10557	36,29	-103
B	2,05	0,70	55	12345	27,88	-119
C	1,75	0,65	67	15778	25,66	-127

Determinarea densității s-a realizat pe epruvete cu dimensiunile 30x30x10 mm prin metoda volumului de lichid dezlocuit. Pentru fiecare probă, densitatea s-a determinat pe un lot format din cinci probe, în tabel fiind prezentate valorile medii obținute, [59,61,68,81,152,156-160].

Porozitatea este o caracteristică a structurii porilor existenți într-un material și are rolul de a absorbi energia și căldura rezultată din procesul de frânare, [58]. Pentru efectuarea testului de porozitate în ulei a fost folosit ulei de motor (SAE60), probele fiind cântărite și apoi introduse într-un recipient cu ulei unde au fost menținute la 90°C timp de 8 ore. Probele au fost lăsate în recipient timp de 12 ore, până când uleiul s-a răcit la temperatura camerei, după care probele au fost cântărite din nou. Ținând

cont de valorile inițiale și finale ale maselor înregistrate pentru fiecare probă se va determina porozitatea, cu relația [58,148,152-160], rezultatele fiind prezentate în tabelul 7.17:

$$\text{Porozitate}(\%) = \frac{M_f - M_i}{M_i} \cdot 100 \quad (7.2)$$

În care: M_f – masa finală a probelor;

M_i – masa inițială a probelor.

Determinarea durității s-a efectuat pe aparatura existentă în dotarea Laboratorului de Rezistența materialelor din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara, iar încercarea la compresiune s-a efectuat pe o instalație universală de încercare la tracțiune-compresiune, rezultatele fiind prezentate în tabelul 7.17.

Rezultatele sintetizate în tabelul 7.17 arată o densitate relativ scăzută a tuturor probelor realizate din material compozit comparativ cu densitatea metalelor. Densitatea probelor a scăzut odată cu scăderea cantității de metal din rețetă. Cea mai mică densitate este de $1,75\text{g/cm}^3$, obținută pentru proba C. Toate probele au o capacitate de absorbție a uleiului relativ scăzută. Capacitatea de absorbție a uleiului scade odată cu creșterea cantității de pulbere de scoici din rețetă. Capacitatea scăzută de absorbție a uleiului poate fi atribuită pe seama creșterii legăturii dintre liant și materialul de umplură, datorită omogenizării corespunzătoare a constituenților, [57-59, 68-70,152-161]. Din punct de vedere al durității, cea mai mare valoare s-a obținut pentru proba A, iar cea mai mică pentru proba C. Conținutul variabil de metal și cochilii prezintă o valoare diferită a durității materialului.

Probele cu cea mai mare cantitate de pulbere din cochilii de scoici din rețetă au și cea mai mare rezistență la compresiune, respectiv cea mai mare valoare a forței de rupere. Acest lucru se explică prin faptul că particulele sub formă de pulbere s-au distribuit uniform pe matricea metalică, realizându-se o interferență între ele. În condiții de deformare a avut loc o deplasare adecvată a fibrelor organice prin matrice, [58,60-64,146,152-154]. Rezistența la compresiune și modulul elastic longitudinal al materialelor compozite cresc odată cu creșterea cantității de pulbere din cochilii de scoici. Cel mai potrivit material compozit pentru fabricarea plăcuțelor de frână nu poate fi selectat doar pe baza evaluării caracteristicilor fizico-mecanice, [58,60-64,146,152-154]. Acestea au rolul doar de a controla calitatea probelor obținute la finalul procesului de sinterizare. În schimb, proprietățile fizice și mecanice ale materialelor realizate pe baza aceleiași rețete indică faptul că procesul de obținere a materialului compozit este ținut sub control [58].

Pentru determinarea comportamentului la uzură, probele din materiale compozite vor fi supuse unor teste tribologice. În cercetare s-a studiat influența caracteristicilor masice și dimensionale asupra unor parametri de uzură. Principiul testelor tribologice constă în presarea unor pini, realizați din materialele compozite produse, pe un disc rotativ din fontă în vederea determinării caracteristicilor de uzură. Discul din fontă din cadrul experimentărilor este asimilat cu marca G 2500, conform ASTM A 159, destinat realizării discurilor de frână pentru autovehicule, [154-160]. Instalația de testare folosește un regim de frecare uscată, iar metoda de testare este „pin pe disc”. Parametrii tribologici de testare sunt prezentați în tabelul 7.18, [147-160].

Tabelul 7.18

Parametrii tribologici

Putere motor electric [KW]	Turație [rot/min]	Viteza periferică a discului [m/s]	Distanța maximă între axa de rotație și pin [mm]
1	1500	11,77	75

Încărcarea instalației se face prin intermediul unui taler unde s-au așezat greutatea de valoare cunoscută. Evaluarea comportării materialelor testate se face prin metoda gravimetrică. La finalul testelor s-a determinat intensitatea uzurii pinilor și a discului din fontă [161]. În experimentele tribologice, viteza de testare a fost de $3,92\text{ m/s}$, iar distanța de testare față de axa de simetrie a instalației este $R=25\text{mm}$. Parametrii de uzură obținuți la finalul testelor tribologice sunt prezentați în tabelul 7.19. Acest tabel arată că cea mai mare uzură a fost obținută pentru proba A și cea mai mică pentru proba C. Deasemenea, cea mai mare intensitate de uzare a fost obținută pentru compozitul A și cea mai mică pentru compozitul C.

Tabelul 7.19

Indicatori de uzare

Proba	Masa inițială [g]	Masa finală [g]	Uzura [g]	Timp de testare [min]	Rata de uzare	Lungimea de testare [m]	Intensitatea de uzare [g/m]	Uzura discului din fontă [g]
A	50,8657	49,3243	1,5414	8,5	0,1813	5000	0,000308	0,327
B	48,3395	47,3571	0,9824		0,1155		0,000196	0,289
C	47,3315	46,853	0,4785		0,0560		0,000095	0,198

Pe măsură ce crește cantitatea de pulbere din cochilii de scoici din rețetă, scade uzura, dar și intensitatea uzării. Uzura discului din fontă este mult mai mică decât uzura materialelor compozite. Acest lucru arată că rezistența la uzură nu depinde foarte mult de cantitatea de metal din rețetă. Această situație este foarte importantă pentru soluțiile practice deoarece plăcuțele de frână se înlocuiesc mai ușor decât discul de frână. În timpul experimentelor, probele au fost cronometrate și cântărite la intervale de timp și lungimi de parcurs, valorile obținute fiind reprezentate grafic în figurile 7.38-7.40, [150].

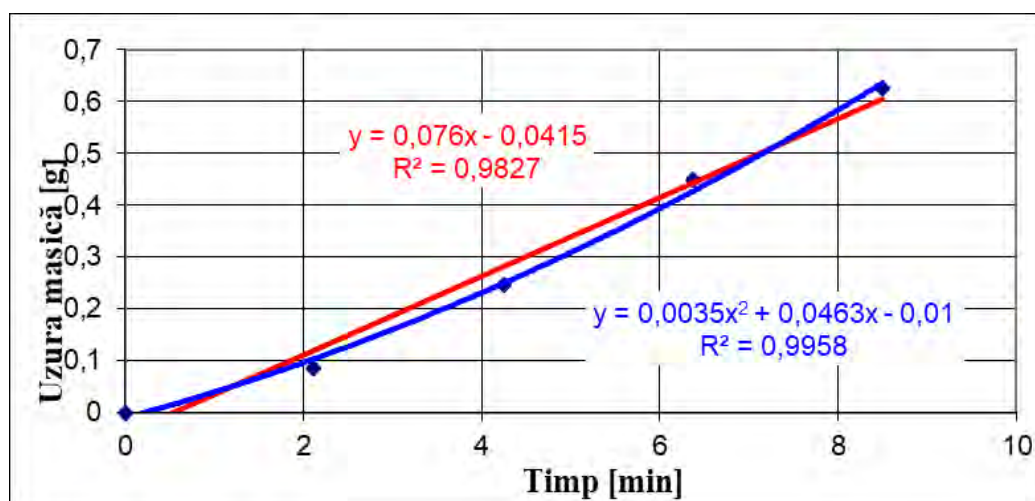


Fig.7.38 Uzura masică-proba A

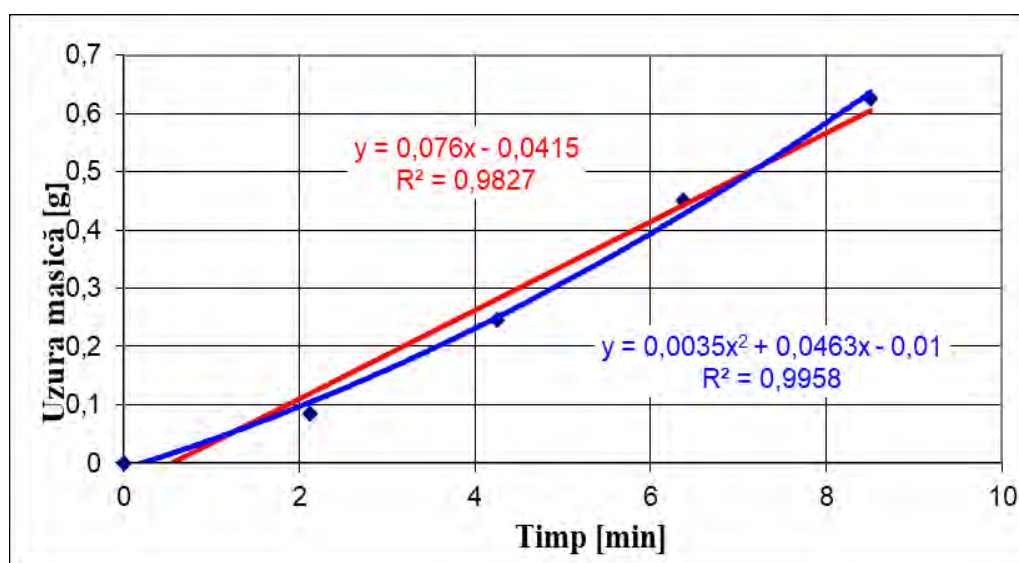


Fig. 7.39 Uzura masică-proba B

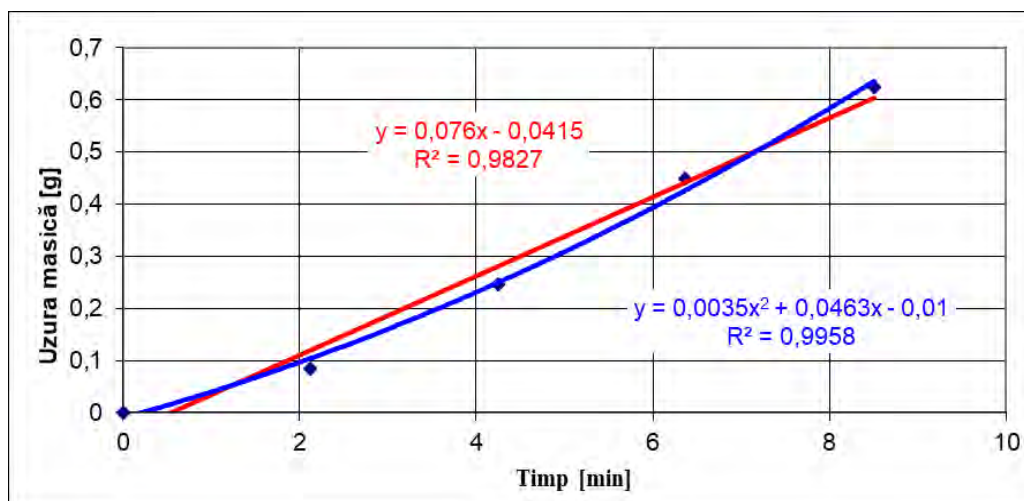


Fig. 7.40 Uzura masică-proba C

Analizând graficele s-a observat că s-au obținut rezultate semnificative din punct de vedere al coeficienților de corelație. Determinarea coeficientului de frecare a fost efectuată pe un echipament de testare a cărui principiu de funcționare are la bază metoda „pin pe disc”. Parametrii de testare utilizați în experiment sunt prezentați în tabelul 7.20, [150].

Tabelul 7.20

Parametrii de determinare a coeficientului de frecare

Raza de testare [mm]	Turația [rot/min]	Timpul de testare [s]	Distanța de testare [m]
25	150	18000	2200

Evoluția coeficientului de frecare pe parcursul experimentelor se prezintă în fig. 7.41-7.43.

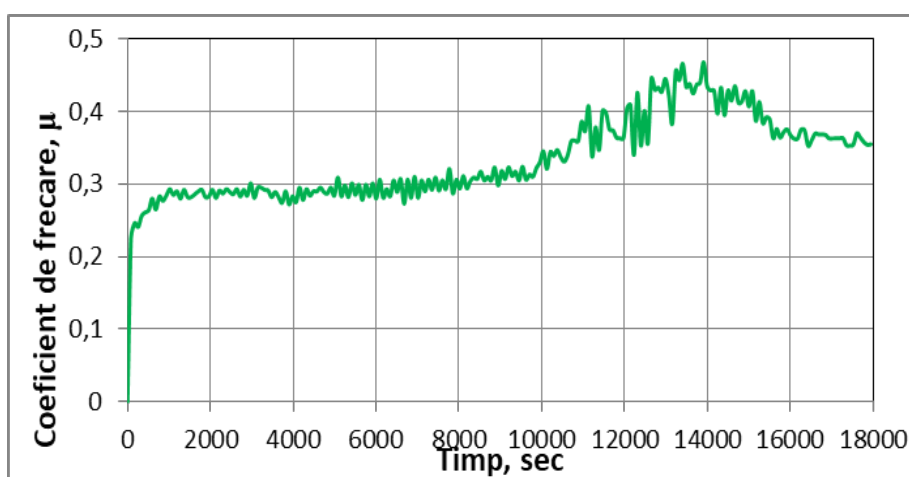


Fig. 7.41 Evoluția coeficientului de frecare pentru proba A

Coeficientul de frecare are fluctuații mari în jurul valorii 0,35-0,45, valorile obținute confirmând valorile din literatura de specialitate, [58,150,154-159]. La începutul încercărilor, coeficientul de frecare variază ca urmare a contactului discontinuu dintre pinul instalației (bilă de oțel) și probele de material compozit, din cauza neregularității suprafeței frontale a probei.

Creșterea suprafeței de contact dintre materialele compozite și pin, după o anumită perioadă de timp de la începutul experimentelor, a dus la creșterea valorii coeficientului de frecare. Pentru toate probele testate, coeficientul de frecare se stabilizează în timp după un interval de testare de 16000-18000s. Cea mai mare valoare a coeficientului de frecare a fost obținut pentru proba C, care are cea mai mare cantitate de pulbere din cochilii de scoici. Valoarea coeficientului de frecare pentru această probă, la finalul experimentărilor, este 0,45.

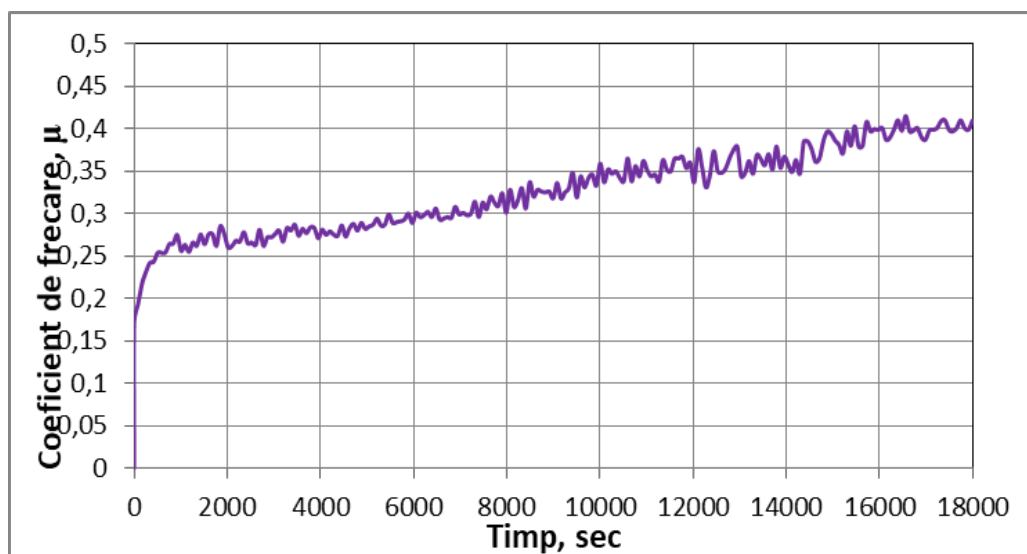


Fig.7.42 Evoluția coeficientului de frecare pentru proba B

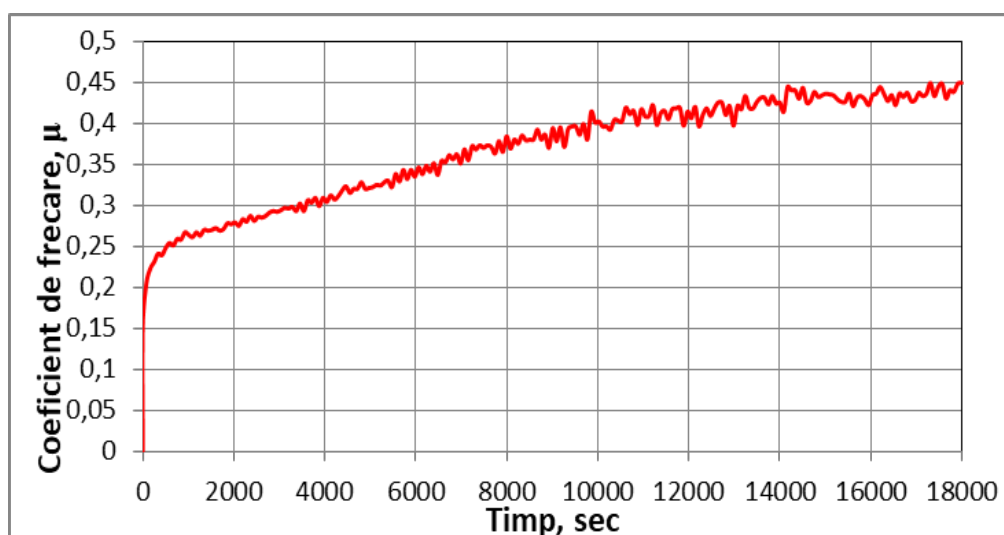


Fig.7.43 Evoluția coeficientului de frecare pentru proba C

În urma experimentelor efectuate s-a ajuns la următoarele concluzii:

- densitatea materialelor organice compozite produse crește odată cu creșterea cantității de pulbere din cochilii de scoici din rețetă;
- porozitatea scăzută a fost determinată de omogenizarea corespunzătoare a constituenților rețetei;
- duritatea, rezistența la compresiune și modulul Young cresc odată cu creșterea cantității de pulbere de scoici din rețete;
- omogenitatea amestecului supus procesului de sinterizare a asigurat integritatea structurală a materialelor compozite rezultând caracteristici fizico-mecanice superioare;
- coeficientul de frecare obținut se încadrează în standardul recomandat pentru plăcuța de frână destinată autovehiculelor mici și performanțe medii;
- materialul compozit cu cele mai bune caracteristici fizico-mecanice și tribologice este proba C, cu cea mai mare cantitate de pulbere de scoici din rețetă;
- rezultatele obținute în această cercetare indică faptul că pulberea de scoici poate fi utilizată ca material de umplutură în producția de plăcuțe de frână;
- inconvenientul major în producerea acestor materiale compozite este recuperarea cochiliilor scoicilor.

7.5 Concluzii și direcții viitoare de cercetare

Ca urmare a studiilor efectuate în cadrul acestui capitol se poate concluziona că:

- Materialele compozite organice sunt materiale eterogene, alcătuite din mai multe componente cu proprietăți diferite, prin urmare, alegerea constituenților și a procentului acestora în rețete va afecta în mod semnificativ comportamentul în funcționare;
- Materialele compozite destinate realizării plăcuțelor de frână au o densitate redusă comparativ cu a metalelor și o bună stabilitate dimensională;
- Constituenții materialelor compozite determină structura și proprietățile fizico-mecanice și tribologice ale acestora;
- Proprietățile fizico-mecanice ale materialelor compozite cu fibre naturale depind de comportamentul, concentrația, distribuția și orientarea fibrelor naturale;
- Caracteristici fizico-mecanice superioare au fost obținute datorită integrității structurale a probelor obținute după sinterizare;
- Proprietățile fizico-mecanice ale materialelor de fricțiune depind de parametri procesului tehnologic de sinterizare;
- Optimizarea proporției componentelor din rețetă are influență asupra obținerii unor caracteristici fizico-mecanice și tribologice superioare;
- Cunoașterea unor parametri de uzură, a temperaturii în zona de contact a cuplelor de frecare, precum și a evoluției coeficientului de frecare sub diferite valori ale forțelor de apăsare, permit aprecierea durabilității în funcționarea materialelor compozite;
- În cazul ambelor materiale compozite produse în laborator, valorile obținute pentru coeficienții medii de frecare, califică aceste materiale în categoria celor care pot fi utilizate în realizarea plăcuțelor de frână pentru autovehiculele mici și performanțe medii, destinate traficului urban;
- Inconvenientul producerii materialelor compozite cercetate este prețul materiei prime.

Cercetările efectuate au deschis unele direcții viitoare de cercetare care se referă la:

- *utilizarea altor tipuri de fibre organice, avantajoase din punct de vedere economic sau a unei combinații de fibre (in, rapiță, trestie) în producerea materialelor de fricțiune;*
- *studiul comportării la temperaturi ridicate și influența acestora asupra proprietăților mecanice;*
- *studiul influenței frecvenței solicitărilor asupra rezistenței la oboseală,*
- *analiza mecanismului de deteriorare a materialelor compozite produse;*
- *studiul ciclului de viață al materialelor compozite în vederea estimării impactului pe care produsul final îl are asupra mediului;*
- *analiza efectelor pe termen lung asupra sănătății umane.*

Ca orice cercetare dezvoltată pe o temă dată, nu se poate spune că se finalizează la un moment dat, deoarece permanent se pot deschide oportunități de dezvoltare și aprofundare, cu reluarea etapelor parcurse în cercetare sub o altă abordare sau prin impunere de noi tehnici de lucru.

PARTEA a-II-a

EVOLUȚIA ȘI DEZVOLTAREA CARIEREI PROFESIONALE, ȘTIINȚIFICE ȘI ACADEMICE

În această parte a tezei de abilitare voi face referiri la perspectivele privind dezvoltarea carierei didactice, științifice și academice. Perspectivele vor viza evoluția și dezvoltarea carierei mele profesionale care va avea ca fundament abilitățile și competențele pe care le-am dobândit până în prezent.

Planul de dezvoltare al carierei universitare pe care doresc să îl prezint în continuare este corelat cu planul de dezvoltare al Facultății de Inginerie din Hunedoara. În acest sens, îmi propun să contribui la creșterea standardelor de excelență academică, să realizez cât mai multe din imperativele didactice care sunt în responsabilitatea mea, să acord o importanță deosebită colaborării cu colegii și studenții, fiind convinsă că toate aceste aspecte mă vor ajuta să îmi construiesc o reputație profesională excelentă care v-a asigura o vizibilitate crescută Departamentului de Inginerie și Management din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara.

Evoluția activității mele științifice și de cercetare a fost și va fi ghidată în continuare de o serie de principii, cum sunt: competența, profesionalismul, motivarea, transparența și creativitatea. Consider că aceste principii sunt esențiale în dezvoltarea mea atât ca și cadru didactic, dar și ca cercetător.

Obiectivul general de evoluție și dezvoltare al carierei se bazează pe trei direcții principale: didactic, științific și academic. În continuare, voi prezenta obiectivele propuse de autoarea acestei teze de abilitare în evoluția și dezvoltarea carierei academice, profesionale și științifice.

OBIECTIVE PROPUSE PENTRU DEZVOLTAREA CARIEREI DIDACTICE

Principalele direcții de dezvoltare și perfecționare a activității didactice propuse de autoare, sunt următoarele:

- Îmbunătățirea aptitudinilor și a competențelor din cadrul activității didactice pentru transmiterea către studenți a unor cunoștințe cu aplicabilitate practică care să îi ajute în profesia de inginer;
- Elaborarea și publicarea de cursuri, îndrumare cu aplicații practice pentru orele de laborator și îndrumare de proiect pentru disciplinele predate în conformitate cu planurile de învățământ;
- Dezvoltarea abilităților privind utilizarea limbilor străine în activitatea de predare;
- Asigurarea unui echilibru între cunoștințele teoretice și cele practice transmise studenților;
- Adaptarea prelegerilor la noile tehnologii existente;
- Atragerea și implicarea studenților în activitatea de cercetare științifică, precum și stimularea acestora prin participarea la manifestări științifice studențești;
- Încurajarea și pregătirea studenților în vederea participării la programe ERASMUS, CEPUS sau stagii de practică în străinătate
- Participarea la programe de formare și dezvoltarea de noi parteneriate educaționale organizate de universități din țară;
- Aplicarea unor metode educaționale noi, moderne, interactive, centrate pe student;
- Controlul și îndrumarea activității studenților, într-o atmosferă academică, și de respect reciproc;
- Continuarea îmbunătățirii și dezvoltării infrastructurii de cercetare din laborator;
- Creșterea ponderii lucrărilor de licență și disertație care se vor finaliza cu realizări practice.

OBIECTIVE PROPUSE PENTRU DEZVOLTAREA CARIEREI ȘTIINȚIFICE

Principalele direcții de dezvoltare și perfecționarea carierei științifice propuse de autoare, sunt următoarele:

- Continuarea activității de cercetare abordate în cadrul celor două direcții de cercetare, precum și extinderea lor la alte niveluri;
- Atragerea de fonduri pentru cercetare prin depunerea de proiecte de cercetare cu teme de actualitate în cadrul unor competiții naționale și internaționale;
- Demararea de colaborări multidisciplinare cu centre de cercetare din țară și străinătate;
- Continuarea colaborării cu echipa de cercetători din cadrul Universității Sangam, Bilwara, Rajasthan, India, Departamentul de Inginerie Mecanică;
- Implicarea studenților și a doctoranzilor către noi direcții de cercetare;
- Diseminarea rezultatelor obținute prin publicații ISI cu factor de impact;
- Valorificarea rezultatelor cercetării științifice prin publicarea de monografii, cărți de specialitate sau capitole în cărți în edituri recunoscute, naționale și internaționale;
- Participarea la conferințe și congrese naționale și internaționale pentru diseminarea rezultatelor cercetării științifice obținute de colectivele de cercetare din care fac parte ca și coordonator sau membru;
- Îmbunătățirea și creșterea vizibilității științifice prin extinderea colaborărilor atât pe plan național cât și internațional și deasemenea implicarea nemijlocită a sectorului industrial.

OBIECTIVE PROPUSE PENTRU DEZVOLTAREA CARIEREI ACADEMICE

Principalele direcții de dezvoltare și perfecționare a carierei academice propuse de autoare, sunt următoarele:

- Menținerea și creșterea standardelor de excelență academică și profesională, cât și colaborarea nemijlocită cu colegii;
- Dezvoltarea colaborării cu profesorii și cercetătorii de prestigiu din țară și străinătate în scopul identificării posibilităților de cooperare și atragerea lor ca membri în programe de cercetare comune;
- Colaborarea cu mediul economic, atât în cercetare, cât și în problemele educaționale;
- Menținerea permanentă a interesului pentru noutate și inovare;
- Dobândirea gradului didactic de profesor universitar.

Obținerea titlului de cadru didactic abilitat reprezintă o recunoaștere a tuturor realizărilor obținute de-a lungul carierei și consider că acest lucru va contribui și la creșterea vizibilității departamentului, a facultății și a universității din care fac parte.

BIBLIOGRAFIE

Referințe bibliografice generale

- [1].https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2018/09/Stiinta_Materialelor_Metalice.pdf
- [2].<http://www.materiale-compozite.ro/ro/blog;Despre-materiale-compozite;cat1/Domenii-principale-de-utilizare;id3.html>
- [3].<https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/Carcea4-Materiale%20Compozite.%20Fenomene%20la%20interfata.pdf>
- [4].Durduc C., *Cercetari industriale privind îmbunătățirea tehnologiei de laminare a oțelurilor slab aliate cu continut de carbon mai mic de 0,2%*- Teză de doctorat
- [5].<http://marcel.suciu.eu/cartea/Laminare-partea2.pdf>
- [6].Cazimirovic E. (2001) *Teoria laminarii*, Ed. BREN, București
- [7].Cazimirovic E., Samoilescu, S. (1987) *Calibrarea cilindrilor de laminor*, Ed. Tehnică, București
- [8].Rădulescu C. ș.a. (1979) *Utilaje de laminoare*, Ed. Tehnică, București
- [9].Cojocar V., Filipiu C. (2006) *Pregătirea încărcăturii pentru elaborarea fontei în cuptoare cu inducție*, Ed. Samia, Iași
- [10].Kiss I. (2005) *Cercetari privind îmbunătățirea calității cilindrilor de laminor turnați din fontă cu grafit nodular*, Universitatea Politehnica București, Teză de doctorat
- [11].Sporea I. (2000) *Variațiile compozițiilor chimice pe secțiunea cilindrilor de laminoare tip Adamit* Simpozionului Internațional "Universitaria ROPET 2000", 361-362, Petroșani
- [12].Kiss I. (2008) *Cilindrii de laminar-abordări ale calității în cercetarea multidisciplinară*, Ed. Mirton, Timișoara
- [13].Sporea I., Josan A, Mihaș G. (2003) *Studii și încercări asupra cilindrilor de laminare tip Adamit calitatea R-A2-* Analele Universității "Valahia", Târgoviște, 41-44
- [14].Badea, S. (1983) *Bazele proceselor de deformari plastice*, Ed. Tehnică, București
- [15].Melan E., Parkus H. (1958) *Tensiunile termoelastice produse de câmpurile staționare de temperaturi*, Fizmatgiz, Moscow
- [16].Goto K., Mase T., (1991) *Friction and wear properties of Graphite cast Iron for hot working rolls*. *Tetsu-to-Hagané*, 77(1), 107–114
- [17].Toader St. (1980) *Cercetări asupra rezistenței la oboseală termică și distrugerea cilindrilor de laminare din caje degrositoare*, Universitatea din Petroșani, Teză de doctorat
- [18].Sofroni L, ș.a. (1983) *Contribuții la îmbunătățirea calității cilindrilor de laminor obținuți prin turnare*, Revista Metalurgia, Nr.10, 473
- [19].Chițu Ghe. (2003) *Cercetări privind îmbunătățirea structurii producției de oțel în România și la nivel mondial-* Revista Metalurgia, Nr.5, 9 -14
- [20].Sporea I. ș.a. (2002) *Unele considerații privind influența structurii asupra durabilității cilindrilor de laminare de tip Adamit* - Al IV^{lea} Simpozion Internațional "Tinerii și cercetarea multidisciplinară", Ed. Sudura, Timișoara,
- [21].Wusatowski, Z. (1972) *Bazele laminării*, Editura Tehnică, București
- [22].Țelikov A.I., Smirnov V.V. (1961) *Laminoare*, Ed. Tehnică, București
- [23].Sturza, S., Bozga, L. (1992) *Culegere de STAS-uri (uz intern)* - S.C. Siderurgica S.A., Hunedoara
- [24].Ponomareov S.D., Biderman V.L. (1960-1964) *Calculul de rezistență în construcția de mașini*, vol. I, II și III, Ed. Tehnică, București
- [25].Sofroni L, ș.a. (1983) *Contribuții la îmbunătățirea calității cilindrilor de laminor obținuți prin turnare*, Revista Metalurgia, Nr.10, 473.
- [26].Kiss I. s.a. (2008) *Cercetări privind asigurarea calității cilindrilor de laminor prin modelarea matematică a procesului de fabricație și prin studiul experimental al durabilității în exploatare*, Contract CEEEX 5889/2006 –2008
- [27].Mitroi C. (1976) *Aspecte privitoare la particularitățile de turnare a cilindrilor din oțel hipereutectoid de tip Adamit*, Revista Metalurgia, Nr.3, 141.
- [28].Pleșa D. (2004) *Cercetări privind comportarea cilindrilor în procesul tehnologic de laminare la cald, în vederea creșterii durabilității în exploatare*, Universitatea din Petroșani, Teză de doctorat
- [29].Păucă A. (2014) *Cercetări privind îmbunătățirea caracteristicilor cilindrilor de laminor și comportarea acestora în exploatare*, Unversitatea Politehnica Timișoara, Teză de doctorat
- [30].Șicikov A.N. (1974) *Temperaturnâi rejim listoprokatnâh valov*, Izdatelstvo Leningradskogo Universisîțeta
- [31].Tretiakov A.V., Garberg E.A. (1976) *Rasciotâ i isledovanie prokatnâh valov*, Izdatelstvo Metallurghia, Moskva

- [32].Maksay Șt.,Toader Șt. (1982) *Contribuții matematice asupra distribuirii câmpurilor de temperaturi în stratul superficial al cilindrilor laminoarelor degrositoare de tip bluming*, Conferința „Tribotehnica 1982”, Ploiești, vol. III, 67-72.
- [33].Zygmunt W. (1972) *Bazele laminării*, Ed. Tehnică, București
- [34].Josan, A. (2002) *Studies and researches on the influence of chemical composition of cast rolls made of hypereutectic steel, on their hardness in exploitation*, Jahorina-IRMES 2002, Srpsko Sarajevo, 403-408
- [35].Kiss, I. (2009) *Experimental research on durability in exploitation of rolling mill rolls*, Tehnicki vjesnik, 16 (2), 3-8,
- [36].Alexa, V., Rațiu, S., Kiss, I. (2016), *Metal rolling—asymmetrical rolling process*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 106 (1), 012019
- [37].Alexa V., Kiss, I., Rackov M., Kuzmanovic S. (2012) *Study on the advance and delay phenomenon's in the asymmetric longitudinal rolling process*, The 7 International Symposium “Shape, Mechanical And Industrial Design Of Products In Mechanical Engineering”, KOD 2012, Balatonfured, Hungary, 415–420
- [38] Josan, A., ș.a. (2002) *Cercetări privind creșterea durabilității în exploatare a cilindrilor turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara – Contract de cercetare nr. 672*
- [39] Bularda N. (2015) *Aliaje metalice utilizate la fabricarea jantelor destinate pentru autovehiculele rutiere*, Universitatea Politehnica Timișoara, Teză de doctorat
- [40].Moning R., Keller R.R., Volkert C.A. (2004) *Thermal fatigue testing of thin metal films* Rev. Sci. Instrum., Vol. 75, No. 11
- [41].Teberean I, Botean A.I. (2003) *Thermal and mechanical loads in a piston pin for an internal combustion engine*, ESFA 2003, The 7th International Conference Fuel economy, safety and reliability of motor vehicles, vol.2, Ed. Politehnica Press
- [42].Botean A. (2010) *Studiul solicitărilor termo-mecanice în motoarele cu ardere internă utilizând metode moderne de cercetare*, Raport de cercetare, nr.Td2, cod CNCIS 230
- [43].Popa, B., Băgaș, N., (1978) *Solicitări termice în construcția de mașini*, Ed.Tehnică, București
- [44].Alecsandrescu P., (1996) *Oboseala termooligociclică*, Ed. Tehnică, București
- [45].Nădășan, Șt., ș.a. (1962) *Oboseala metalelor*, Ed. Tehnică, București
- [46].Kiss, I. (2007) Laboratory experiments regarding the durability in exploitation of the hot rolling mill cylinders, *Metalurgia internațională*, 12(9), 20-27
- [47].Băgaș, N., Brânzaș, P., Iancu, A. (1970) *Determinarea câmpului de temperatură pentru piesele de autovehicule solicitate termic*. *Metrologia aplicată*, Nr. 6,
- [48].Bobescu Gh.ș.a. (1998) *Motoare pentru automobile și tractoare*, vol.II - *Dinamică, calcul și construcție*, Ed. “Tehnică” Chișinău
- [49].Jimbo Y., Mibe T., Akiyama K., Matsui H., Yoshida M., Ozawa A. (1990) *SAE International*. SAE 900002, 22
- [50] Botean A. (2005) *Studiul transferului de căldură din camera de ardere a unui motor cu aprindere prin scânteie, a-V-a Conferință Națională multidisciplinară „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”*, Sebeș, Vol. 8, Ed. AGIR, București, 41
- [51] Nicholson I (1995), *Facts About Friction*, P&W Price Enterprises, Inc., Croydon, PA
- [52] Buzdugan, Gh. (1980) *Rezistența Materialelor*, Ed. Tehnică, București
- [53] Manson S.S. (1981) *Thermal stress and low – cycle fatigue*, Krieger Pub Co
- [54] Popescu C., Șoflete L., Mateiu Șt. H., Murariu A.(1998) Brevet de invenție, *Instalație de încercare la oboseală termică*, Institutul de sudură și încercări de materiale, Nr. 98-01632
- [55] Popescu I.N., Ghita C., Bratu V., Navarro G.P. (2013) *Tribological behaviour and statistical experimental design of sintered iron-copper composites*, *Appl. Surf. Sci.*, 285P, 72
- [56] Terciu O.M., Curtu I., Cerbu C., Stanciu M.D. (2012) *Testarea la tracțiune a materialelor compozite lignocelulozice cu aplicații în industria autovehiculelor*, *Buletinul AGIR* nr. 1, 40-44
- [57] Maleque M.A., Atiqah A., Talib R.J., Zahurin H.(2012) *New natural fibre reinforced aluminium composite for automotive brake pad*, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 7, No. 2, 166-170.
- [58]. Crăciun A L. (2018) *Cercetări asupra materialelor compozite destinate sistemului de frânare al autovehiculelor*, Universitatea Politehnica Timișoara, Teză de doctorat
- [59]. Blau P.J. (2001) *Compositions, functions and testing of friction brake materials and their additives*, Metals an ceramics division,
- [60]. Sutikno M., Marwoto P., Rustad S. (2010) *The mechanical properties of carbonized coconut char powder-based friction materials*, www.elsevier.com/locate/carbon 48, 3616-3620
- [61]. Sapuan S. M., Harimi M., Maleque M.A. (2003) *Mecanical properties of epoxy/ coconut shell filler particle composites*, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 28(2B), 171-181
- [62]. Curtu I., Stanciu A.E (2011) *Determinarea caracteristicilor mecanice ale epruvetelor realizate din material compozit tip Mat-Roving*, *Buletin AGIR* Nr.1, 76-81

- [63]. Feist J. (2013) *Tribological Investigation on Automotive Disc Brakes*, MANE – 6960 Friction Wear and Lubrication
- [64]. Ademoh A., Nuhu I., Adeyemi I., Olabisi I. (2015) *Development and Evaluation of Maize Husks (Asbestos-Free) Based Brake Pad*, International Institute for Science, Technology and Education, Industrial Engineering Letters, 5(2), 67–80
- [65]. Tanaka K., Ueda S., Noguchi N. (1973) *Fundamental studies on the brake friction of resin-based friction materials*, Wear, Vol.23, 349-365
- [66]. Todorovic J. (1987) *Modelling of the tribological properties of friction materials used in motor vehicles brakes*, Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. C 226, 911-916
- [67]. Sasaki Y. (1985) *Development philosophy of friction materials for automobile disc brakes*, The 8th International Pacific Conference on Automobile Engineering, Society of Automobile Engineers of Japan, pp. 407-412
- [68]. Asif M., Chandra K., Misra P.S. (2011) *Development of aluminium based hybrid metal matrix composites for heavy duty applications*, Journal of Minerals&Materials Characterization& Engineering 10 (14), 1337-1344
- [69]. Cicală E. (1999) *Metode de prelucrare statistică a datelor*, Ed. Politehnica Timișoara
- [70]. Mackin T.J., (2002) *Thermal cracking in disc brakes*, Engineering Failure Analysis, February, 9 (1) 63-76
- [71]. Cho M.H, Ju J., Kim S.J., Jang H (2006) *Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb_2S_3 , MoS_2) for automotive brake friction materials*, Wear 260, 855-895
- [72]. Edokpia R.O., Aigbodion V.S., Obiorah O.B., Atuanya C.U(2014) *Evaluation of the Properties of Ecofriendly Brake Pad Using Egg Shell Particles–Gum Arabic*, ScienceDirect, Elsevier 10.1016/j.rinp.2014.06.003
- [73]. Hsu S.M., Shen M.C., Ruff A.W. (1997) *Wear prediction for metals*, Tribology International 30, 377-383
- [74]. Maluf O., Angeloni M., CastroD.B.V., Bose Filho W., Spinelli D., Ruckert C.O. (2009) *Effect of alloying elements on thermal diffusivity of gray cast iron used in automotive brake disc*, Journal of materials engineering and performance, 18 (7), 980-984
- [75]. Masoud I.M., Al-Jarrah J.A., Abu Mansour T. (2014) *Manufacturing of Gray Cast Iron Automotive*, Indian Journal of applied research, 4(3), 129-131
- [76]. Cueva G., Sinatora A., Guesser W.L., Tschiptschin A.P (2003) *Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors*, Wear 255, 1256–1260
- [77]. Ștefănescu C, Cazacu I. (1981) *Implementing technologies molded parts*, Ed. Tehnică, București, 34-35
- [78]. Ripoșan I., Chișamera M. (1981) *Technology development and pig iron*, Ed. Didactică și Pedagogică, București
- [79]. Nicolae O.I. (2013) *Impactul materialelor compozite utilizate în construcții asupra mediului*, București, Teză de doctorat
- [80]. Leman Z., Sapuan S. M., Saifol S. M., Maleque A. M., Ahmad M.M. (2008) *Moisture absorption behavior of sugar palm fibre reinforced epoxy composites*, International Journal of Materials and Design 29(8), 1666-1670
- [81]. Park J. H., Chung J. O., Kim H. R. (2010) *Friction characteristics of brake pads with aramid fiber and acrylic fiber*, Industrial Lubrication and Tribology, 62(2), 91–98
- [82]. *Fișă tehnică plăcuță de frână realizată din material semimetalic*
- [83]. Chawla K. K.(2012) *Metal Matrix Composites*, Composite Materials, Springer New York, 197-248
- [84]. Deborah D. L. (2010) *Composites Materials science and applications*, Springer London
- [85]. Pascu L.V. (2014) *Cercetari privind îmbunătățirea calității saboților de frână destinați materialului rulant*, Universitatea Politehnica Timișoara, Teză de doctorat
- [86]. Anderson A.E. (1992) *Friction and wear of automotive brakes*, ASM Handbook, Friction Lubrication and Wear Technology, vol 18, ASM International, MaterialPark, Ohio, 569-577
- [87]. Amaguci Y., Ahodas J. (1991) *Nob-asbestos, Non-Metallic and Non-Glass Brake Pad Composite*, Automotive Engineering 99, 12
- [88]. Vijay R., Jeas J.M., Saibalaji M.A., Thiyagarajan V. (2013) *Optimization of Tribological Properties of Nonasbestos Brake Pad Material by Using Steel Wool*, Advances in Tribology
- [89]. *** *Principiile dezvoltării durabile, adoptate în 2005 în cadrul strategiei Lisabona*
- [90]. *** Guttikunda S.K., Goel R., *Health impacts of particulate pollution in a megacity-Delhi, India. Environmental Development*, 6(1), 2013, p.8
- [91]. *** *EU Natura 2000 network - EU nature & biodiversity policy*,
<http://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000>
- [92]. *** *Cercetări privind creșterea durabilității în exploatare a cilindrilor turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, La S.C. „Siderurgica” S.A. Hunedoara- Contract de cercetare Nr.672/2002*
- [93]. *** *Instrucțiuni tehnologice de fabricație a cilindrilor de laminor de tip Adamit din oțel hipereutectoid, marca OTA3*
- [94]. *** ECE R90- Regulation No. 90, *Uniform provisions concerning the approval of replacement brake lining assemblies, drum brake linings and discs and drums for power-driven vehicles and their trailer*
- [95]. *** *Stabilirea tehnologiei de fabricație a cilindrilor din oțel hipereutectoid-tip Adamit - ICEM, Contract de cercetare nr.1283/1973*

- [96].* * * *Analiza calității cilindrilor de laminor în vederea reducerii costurilor și influența asupra calității laminatelor* S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, Uzina laminoare, Contract 2400/279/05.07.2002
- [97].* * * *Urmărirea pe fluxul de fabricație a cilindrilor de laminor din Fgn și tip Adamit*, S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, Contract de cercetare, Centrul de cercetare-proiectare, Hunedoara, 1998
- [98].* * * *Tehnologie experimentală pentru execuția cilindrilor din oțel hipereutectoid la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara*, Caiet de sarcini, Hunedoara, 1995
- [99].* * * *Stabilirea tehnologiei de fabricație a cilindrilor din oțel hipereutectoid-tip Adamit* - ICEM, Contract de cercetare nr.1283/1973

Referințe bibliografice proprii

- [100] **Pinca-Bretotean Camelia**, Plesa, D., Toader, Șt.(2003) *Considerations concerning the impact of thermal fatigue upon the hot rolling cylinders*, VII International Symposium Interdisciplinary Regional Research, 494–499
- [101] Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia** (1998) *Considerații privind determinarea analitică a tensiunilor termice în cilindrii de laminare la cald*, Buletin Științific al UPT, Tom 43, Fascicola 1, 15–22
- [102]. Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia** (1998) *Determinarea temperaturii optime de încălzire inițială a cilindrilor de laminoare din caje degrositoare*, Buletin Științific al UPT, Tom 43, Fascicola 1, 23–30
- [103] Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia** (1997) *Studiul fisurilor de oboseala termica din stratul superficial al calibrelor cilindrilor de laminare din caja pregatitoare a unui laminor de profile grele $\Phi 650$ mm*, Sesiunea Aniversara de Comunicări Științifice, Hunedoara, Vol.I, 275–281
- [104]. Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia** (1995) *Studiu privind influența vitezei de laminare asupra câmpului de temperaturi din cilindrii de laminare*, Sesiune aniversară de comunicări științifice Hunedoara, Vol. V, 32–37
- [105] Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia** (1997) *Cercetări asupra variațiilor de temperaturi în cilindrii cajei pregatitoare dintr-un laminor de profile grele $\Phi 650$ mm*, Sesiunea Aniversară de Comunicări Științifice, Hunedoara, Vol.I, pag. 282–289
- [106]. Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia** (1996) *Cercetări asupra rezistenței la oboseala termica a cilindrilor de laminare la cald*, Sesiunea Aniversară de Comunicări Științifice, Hunedoara, Vol.I, 290–298
- [107].Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia** (1996) *Cercetări asupra rezistenței la oboseală termică a cilindrilor de laminare la cald*, Contract de cercetare științifică, Nr. 7004/1997, Consiliul Național al Cercetării Științifice Universitare, București
- [108] Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia** (1997) *Cercetări asupra variațiilor eforturilor unitare produse de variațiile de temperaturi în stratul superficial al calibrelor cilindrilor cajei pregatitoare dintr-un laminor de profile grele $\Phi 650$ mm*, Sesiunea Aniversară de Comunicări Științifice, Hunedoara, Vol.I, 290–298
- [109] Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia** (1997) *Cercetări asupra rezistenței la oboseală termică a cilindrilor de laminare la cald*, Contract de cercetare științifică Nr. 7004/1997, Tema 43, cod CNCISU 11.221, Consiliul Național al Cercetării Științifice Universitare, București
- [110] Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia** (1998) *Considerations regarding the analytical determination of thermal stress which operate in the hot rolling cylinders*, Buletinul Științific al Universității Politehnica Timișoara, Tom 43(57), Fascicola 1, 15...22
- [111] Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia** (1999) *Considerations regarding the determination of thermal stress which act the rolling cylinders from the stand of a $\Phi 1300$ mm blooming rolling mill*, Buletinul Științific al Universității Politehnica Timișoara, Tom 44(58), Fascicola 2, 33...40
- [112] **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O, Josan A., Mihuț G., Kiss I., Miklos C., Rațiu S., *Cercetări de durabilitate în exploatare a cilindrilor de laminare la cald*, Grant CNCIS, AT 32 940/ 22.06.2005 cod CNCIS 24, Tema 7
- [113] **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O, Kiss I., Ardelean M., Budiul A, *Cercetări și experimentări privind tensiunile termice și echivalente din cilindri de laminare la cald în scopul creșterii duratelor de viață*, Grant CNCIS, AT 58 GR/ 19.05.2006, Tema 3, Cod CNCIS 45
- [114] Toader Șt., **Pinca-Bretotean Camelia**, Pleșa D. (2004) *Oboseala termică a cilindrilor de laminare la cald*, Ed. Politehnica, Timișoara
- [115] **Pinca-Bretotean Camelia**, Heput T., Kiss I., Tirian G.O (2004) *Reserches upon the durability of the rolling cylinders*, Journal of Mechanical Engineering, 8(3), 177-188
- [116] **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian, Kiss, Josan A (2005) *Experimental researches under the durability of rolling mill cylinders*, 9th International Research/Expert Conference-Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Antalya, Turkey
- [117] **Pinca-Bretotean Camelia** (2005) *Studiul durabilității cilindrilor de laminare*, Raport Grant AT, 32 940/ 22.06.2004, cod CNCIS 24, Revista de Politica Științei și Scientometrie, ISSN 1582- 1218

- [118]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian, G.O., Socalici A.V (2006) *The study of thermal regime of the hot rolling mill cylinders*, 10th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology TMT 2006, Barcelona, Spain, 11-15 September, TMT 06-367
- [119]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O (2006) *The numerical analysis of the asymmetrical thermal tension from hot rolling mill cylinders*, International Conference of Metallurgy and Materials Science, ROMAT, București, 296-303
- [120]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O. (2006) *The researches and experiments regarding the thermal and the equivalent tension from the hot rolling mills cylinders, in avoiding the growing thermal fatigue resistance and the increase of service life*, 10th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Barcelona, Spain, TMT 06-366
- [121]. **Pinca-Bretotean Camelia** (2007) *The study of the behavior in service of rolling cylinders*, 11th International Research/Expert Conference-Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Hammamet, Tunisia, TMT 07-15
- [122]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O. (2007) *Researches upon thermo-mechanical stresses to the hot rolling mills cylinders*, 11th International Research/Expert Conference -Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Hammamet, Tunisia, TMT 07-013
- [123] **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O., (2007) *Posibilities to increase the durability of the hot rolling mills cylinders*, 11th International Research/Expert Conference-Trends in the Development of Machinery and Associated Technology TMT 2007, Hammamet, Tunisia, TMT 07-014
- [124] Sharma A.K., Bhandari R., **Pinca-Bretotean Camelia** (2021) *Impact of silicon carbide reinforcement on characteristics of aluminium metal matrix composite*, IOP Conf. Series: Journal of physics, 1781 012031, vol.1781 8(1-8)
- [125]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O (2008) *Determining the composite tension inside the warm rolling cylinders*, 12th International Research/Expert Conference-Trends in the development of machinery and associated technology", TMT 2008
- [126]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O (2008) *The influence of the symmetrical thermal tensions when producing thermal fatigue inside the warm rolling cylinders*, 12th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology”, Istanbul– Turcia, TMT 2008
- [127]. **Pinca Bretotean Camelia**, Tirian G.O., Vîlceanu L. (2008) *The effects of the thermal fatigue upon the hot rolling mill cylinders*, Metalurgia Internațională, XIII (5), 25-33
- [128]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O. (2008) *Instalație pentru determinarea forțelor de laminare*, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 2008, Tom VI , Fasc.1., pg.169-172, ISSN 1584 - 2665
- [129]. Tirian G.O., **Pinca-Bretotean Camelia**, Rusu-Anghel S. (2009) *Cracks prediction using artificial neural networks in continuous casting of steel*, Proceedings of 28th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, Innsbruck, 108-112,
- [130]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Josan A., Preda C., *Numerical and experimental analysis of dry contact in pad disc brake assembly*, Journal of Physics: Conference Series, 1426(1), 1-12
- [131]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O (2008) *Theoretical contribution and original experiments for determining all mathematical relations for calculating symmetrical thermal tension*, Annals of the Oradea University, 2008, Fascicule of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), pg.512..519, ISSN 1583 - 0691
- [132]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O (2008) *The current stage of the research about the thermal shock inside the rolling cylinders*, Annals of the Oradea University, Fascicule of Management and Technological Engineering, VII (XVII), 520-527
- [133]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O (2008) *Experimental installation for studying the lastiness of the rolling cylinders*, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, Tom VI , Fascicula 3, 138-142
- [134]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O. (2009) *Experimental determination of the mechanical stresses on the warm rolling cylinders*, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, Tome VII, Fascicule 3, 378-382
- [135]. Josan Ana, **Pinca-Bretotean Camelia** (2010) *Studies and researches concerning the determination, on casted samples, of the thermic treatment of the hypereutectoid steel, Adamit type*, 11th International Symposium of Interdisciplinary Regional Research, Hungary-Romania-Yugoslavia, Szeged, 97-101
- [136]. **Pinca-Bretotean Camelia** (2010) *Considerații teoretice privind modelarea în laborator a fenomenului de oboseală termică*, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, Tome IV, Fascicule 2, 187-194
- [137]. **Pinca-Bretotean Camelia** (2011) *The finite element analysis of a cylinder head of a spark ignition engine*, Annals of Faculty Engineering Hunedoara, Tome IX Fascicule 3, 239-242
- [138]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O (2011) *Considerations on thermal fatigue internal combustion engines*, Annals of Faculty Engineering Hunedoara, Tome IX, Extra Fascicule 4, 195-198

- [139]. Josan A., **Pinca-Bretotean Camelia** (2011) *Studies and researches concerning the determination of thermal treatment of the adamit type hypereutectoid steel, on cast sample*, Review of Faculty of Engineering "Analecta Technica Sygedimensia", Fascicula 1-2, 97-102
- [140]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Josan A. (2011) *Determination of the variable temperature fields in the cylinder head of a spark ignition engine*, Annals of DAAAM and Proceedings of the International Symposium, Vienna, Austria, 606-607
- [141]. Josan A, **Pinca-Bretotean Camelia**, Rațiu S. (2011) *The effect of thermal tension on quality mill rolls*, Annals of DAAAM and Proceedings of the International Symposium, Vienna, Austria, 1189-1199
- [142]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Josan Ana (2012) *Experimental plant for laboratory research of thermal fatigue phenomenon*, 5th WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG'12), Recent researches in Engineering Mechanics, Urban Naval Transportation and Tourism Cambridge, UK
- [143] **Pinca-Bretotean Camelia**, *Instalație pentru determinarea rezistenței la oboseală termică*- Brevet național invenție, Nr.126966/30.03.2016
- [144] **Pinca-Bretotean Camelia** (2013) *Metode de investigare a oboselii termice la componentele motoarelor autovehiculelor*, Lucrare de disertație, Universitatea Politehnica Timișoara
- [145] **Pinca-Bretotean Camelia**, Vâlceanu L.(2013) *Experimental investigations for modelling the thermal fatigue phenomenon in machines parts of automotive engines*, Acta Technica Corviniensis, Buletin of Engineering, Tom VI, Fascicula 3, 73-78
- [146]. Crăciun A., Hepuț t., **Pinca-Bretotean Camelia** (2016) *Experimental installation use in testing of composite materials for braking system components*, International Journal of Engineering, 14(3), 243-250
- [147]. Crăciun A., Hepuț T., **Pinca-Bretotean Camelia** (2016) *Formulation of materials with natural fiber for brake system components*, International Journal of Engineering, 14 (3), 17-20
- [148]. Crăciun A., Hepuț T., **Pinca-Bretotean Camelia** (2016) *Aspects regarding the evolution of temperature in the automotive brake pad using infrared thermography*, International Journal of Engineering, 14 (4), 103-106
- [149]. Crăciun A., **Pinca-Bretotean Camelia** (2016) *Advanced materials with natural fibred reinforced aluminium composite for automotive brake disc*, Solid State Phenomena, Vol.254, 91-96
- [150]. Crăciun A., **Pinca-Bretotean Camelia**, Uțu D., Josan A., (2017) *Tribological properties of nonasbestos brake pad material by using coconut fiber*, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 163(1), No.012014
- [151]. Crăciun A., Hepuț T., **Pinca-Bretotean Camelia** (2018) *Aspects regarding manufacturing technologies of composite materials for brake pad application*, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 294, No. 012003
- [152]. Crăciun A, Hepuț T., **Pinca-Bretotean Camelia**, (2017) *Mechanical testing of composite materials with organic fibers for automotive brake pad*, Acta Tehnica Corviniensis-Bulletin of Engineering, X(4),111-114
- [153]. Crăciun A., **Pinca-Bretotean Camelia**, Birtok-Băneasă C., Josan A.(2017) *Composite materials for friction and braking application*, IOP Conference Material Science and Engineering, 200(1), No. 012009
- [154]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Josan A., Birtok-Băneasă C (2018) *Laboratory testing of brake pads made of organic materials intended for small and medium vehicles*, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 393(1), No. 012029
- [155]. Kiss I., **Pinca-Bretotean Camelia**, Josan A (2018) *Experimental research upon the durability in exploitation of the Adamite type rolls*, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 393(1), No. 012090
- [156] Crăciun A., **Pinca-Bretotean Camelia**, Uțu D., Josan A (2018) *Experimental analysis of tribological behavior of organic composites materials*, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 416(1) No. 012094
- [157]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Crăciun A., Josan A, Ardelean E. (2018) *Experimental study of sintered friction material with coconut fiber for brake pads*, Materiale Plastice, 55(3), 389-392
- [158]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Crăciun A. Josan A., Ardelean M. (2019) *Friction and wear characteristics of organic brake pads material*, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, Vol. 477(1) No. 012009
- [159]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Lemle L.D., Szabo A. (2019) *Ecological Composites Materials for Brake Pads Using Shells as Filler Material*, Materiale plastice 56(3)
- [160]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Josan A., Puțan V. (2020) *Testing of brake pads made of non asbestos organic friction composite on specialized stand*, Materials Today:Proceedings 10.1016/j.matpr.2021.12.039, 2214-7853
- [161]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Tirian G.O (2012) *Theoretical considerations on laboratory modelling of thermal fatigue phenomenon*, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering, Tom X, Fascicule 2, 167-172
- [162]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Pănoiu C., Rob R. (2014) *Application of virtual instrumentation in determining the temperature fields of hot rolling cylinders*, Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, ISSN 1584-2673, XII(3), 259-264
- [163]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Hepuț T., Josan A. (2016) *Characterization of composite materials reinforced with coconut fibers used for automotive brake pads*, The 40th International Conference on Mechanics of Solids,

Acoustics and Vibrations & The 6th International Conference on “Advanced Composite Materials Engineering” COMAT2016 & ICMSAV2016, Brasov

[164]. Sharma A.K., Bhandari R., **Pinca-Bretotean Camelia**, (2021) *A systematic overview on fabrication aspects and methods of aluminum metal matrix composites*, Materials Today: Proceedings, 45(5), 4133-4138

[165]. Sharma A.K., Bhandari R., Aherwar A., Rimašauskiene R., **Pinca-Bretotean Camelia** (2020) *A study of advancement in application opportunities of aluminum metal matrix composites*, Materials Today: Proc., 26(2), 2419-2424

[166]. Sharma A.K., Bhandari R., Aherwar R., **Pinca-Bretotean Camelia** (2020) *A study of fabrication methods of aluminum based composites focused on stir casting process*, Materials Today-Procedings, Doi.10.1016/j.matpr.2020.03.316, Vol.27 5, 1608-1612

[167]. Sharma A.K., Bhandari R., **Pinca-Bretotean Camelia**, Sharma C., Dhakad S.K. (2021) *A study of trends and industrial prospects of Industry 4.0*, Materials Today: Proceedings 47 (10), 2364-2369

[168]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Bhandari R., Sharma A. K., Sharma C., Preda C., Dhakad S.K. (2021) *An investigation of thermal behaviour of brake disk pad assembly with Ansys*, Materials Today: Proceedings 47 (10), 2322-2328

[169]. Sharma A.K., Bhandari R., Sharma C., Dhakad S.K., **Pinca-Bretotean Camelia** (2021) *A Study On Effects of Reinforcement Materials In Aluminum-Based Metal Matrix Composites*, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) 69 (9), 24-28

[170]. **Pinca-Bretotean Camelia**, Crăciun A., Preda C., Sharma A.K., (2021) *Physico-mechanical and tribological characteristics of composites used for brake pads*, Journal of Physics Conference Series 1781, 012032

[171]. **Pinca-Bretotean Camelia**, (2014) Labview application for diagnosis braking fault, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, Tome 4, Fascicole 2, 87-95

[172]. Sharma A.K., Bhandari R., Sharma C, Dhakad S.K., **Pinca-Bretotean Camelia** (2022) *Polymer matrix composites: A state of art review*, Materials Today :Proceedings 10.1016/j.matpr.2021.12.592 2214-7853