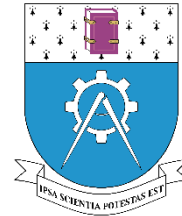




UNIVERSITATEA TEHNICĂ
„GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI
Școala Doctorală a Universității



REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

STUDII PRIVIND COMPORTAMENTUL
SISTEMULUI DE CALE FERATĂ ROATĂ-ȘINĂ ÎN
VEDEREA EXPERTIZĂRII, DIAGNOSTICĂRII ȘI
CREȘTERII FIABILITĂȚII ACESTUIA

Autor: drd. ing. **Igor BLANARI**

Conducător științific: prof. univ. ab. dr. ing. **Viorel GOANȚĂ**

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
RECTORATUL

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de 05 martie 2024 la ora 12. în sala de conferințe „Cezar Opreșan” a Facultății de Mecanică, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

„Studii privind comportamentul sistemului de cale ferată roată-șină în vederea expertizării, diagnosticării și creșterii fiabilității acestuia”

elaborate de domnul **BLANARI IGOR** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. Ianuș Gelu, conf. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
președinte
2. Goanță Viorel, prof. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
conducător de doctorat
3. Hadăr Anton, prof. univ. dr. ing. Universitatea Politehnica din București referent
oficial
4. Mazilu Traian, prof. univ. dr. ing. Universitatea Politehnica din București referent
oficial
5. Paleu Viorel, prof. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
referent oficial

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR, /

Prof.univ.dr.ing. Dan Cascaval



Secretar universitate,

Ing. Cristina Nagiț

CUPRINS

INTRODUCERE	1
CAPITOLUL 1: STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII PRIVIND CONTACTUL ROATĂ-ȘINĂ. OBIECTIVELE TEZEI	5
1.1. Infrastructura feroviară	5
1.2. Suprastructura căii	6
1.3. Materialul rulant de cale ferată	7
1.4. Interacțiunea roată-șină	9
1.4.1. Caracteristicile mecanice și geometrice ce definesc interacțiunea roată-șină	9
1.4.2. Forțe care interacționează la contactul roată-șină	10
1.4.3. Distribuția de presiuni în cazul contactului roată-șină	11
1.4.4. Starea de tensiuni la contactul roată - șină	15
1.4.5. Fenomene de frecare la interfața roată-șină	17
1.4.6. Rugozitatea roților și șinelor de cale ferată	19
1.4.7. Factorii care influențează aderența la contactul roată-șină	20
1.5. Defecte ale roții și șinei de cale ferată	23
1.5.1. Defectele șinelor	23
1.5.2. Defectele roților	28
1.5.3. Defectele și uzura profilelor roților și a șinelor de cale ferată	32
1.6. Menținerea și fiabilitatea roții/șinei de cale ferată	34
1.6.1. Creșterea duratei de viață în serviciu pentru bandaje de locomotivă	34
1.6.2. Recondiționarea prin sudură a elementelor căii	35
1.6.3. Polizarea șinelor de cale ferată	37
1.6.4. Restaurarea roților de cale ferată prin încărcarea cu sudură cu arc acoperit	37
1.7. Direcții de cercetare	39
CAPITOLUL 2: APARATURA EXPERIMENTALĂ	40
CAPITOLUL 3: CERCETĂRI EXPERIMENTALE	41
3.1. Conținutul cercetărilor experimentale	41
3.2. Rezistența la tracțiune și alungirea la rupere	41
3.2.1. Diagrame caracteristice și măsurile obținute la încercarea de tracțiune statică	41
3.2.2. Rezultate obținute privind determinarea modului de elasticitate și a coeficientului Poisson	42
3.2.3. Concluzii	43
3.3. Încercări pentru determinarea tenacității la fisurare sau a rezistenței la fisurare	44
3.3.1. Rezultate experimentale obținute	44
3.3.2. Concluzii	45
3.4. Determinarea vitezei de propagare a fisurii prin oboseală	45
3.4.1. Rezultate experimentale obținute	45
3.4.2. Concluzii	48
3.5. Determinarea tensiunilor remanente în talpa șinelor	48
3.5.1. Rezultate experimentale	48
3.5.2. Calculul deformațiilor specifice principale, a direcțiilor principale și a tensiunilor principale	50
3.5.3. Concluzii	51
3.6. Durata de viață la oboseală	51
3.6.1. Rezultate obținute	51
3.6.2. Concluzii și observații	54
3.7. Variația durtății în diferite puncte de pe șina de cale ferată	54
3.7.1. Variația durtății în axa suprafeței de rulare a șinelor tratate termic	54

3.7.2.	Variația durtății în punctele indicate pe suprafața transversală a ciupercii	55
3.7.3.	Concluzii	57
3.8.	Variația microdurtății în diferite puncte pe suprafața transversală a șinei/bandaj uzat	58
3.8.1.	Variația microdurtății în punctele indicate pe suprafața transversală a ciupercii șinei	58
3.8.2.	Variația microdurtății în punctele pe suprafața transversală a bandajului de locomotivă	58
3.8.3.	Concluzii	59
3.9.	Rezistența la forfecare	59
3.9.1.	Diagrame caracteristice și mărimile obținute la încercarea de forfecare statică	59
3.9.2.	Concluzii	60
3.10.	Evaluarea prin ultrasunete	61
3.10.1.	Rezultate obținute privind determinarea modulului de elasticitate longitudinal, modulului de elasticitate transversal și coeficientul Poisson	61
3.10.2.	Concluzii	61
3.11.	Încercarea la încovoierea prin șoc	62
3.11.1.	Rezultate obținute privind determinarea parametrilor la încercarea de încovoiere prin șoc (reziliența)	62
3.11.2.	Concluzii	62
3.12.	Analiză chimică, microstructurală și metalografică	63
3.12.1.	Analizele tehnice realizate prin microscopie electronică pe eșantioanele prelevate de pe șine	63
3.12.2.	Analizele probelor realizate prin difracție de raze X pe eșantioanele prelevate de pe șinele de cale ferată de tip '85, '86, NOUĂ	63
3.12.3.	Analiza spectrală a eșantioanelor din șină de cale ferată pentru determinarea compoziției chimice	64
3.12.4.	Concluzii finale asupra analizelor microstructurale ale eșantioanelor prelevate de pe șinele de cale ferată	65
3.13.	Cercetări experimentale asupra caracteristicilor fizico-mecanice ale straturilor superficiale a secțiunii transversale șinelor și a bandajului	66
3.13.1.	Rezultate obținute	66
3.13.2.	Concluzii și observații	67
3.14.	Determinarea coeficientului de frecare și a uzurii la contactul roată-șină	68
3.14.2.	Concluzii	72
3.15.	Modelarea contactului roată-șină prin metoda fotoelastică și metoda elementelor finite	74
3.15.1.	Compararea rezultatelor obținute prin metoda fotoelastică și AEF	74
3.15.2.	Concluzii	75
3.16.	Dualitatea încercărilor, determinărilor și analizelor	76
3.16.1.	Managementul riscului în implementarea șinelor ce au fost în exploatare	76
CAPITOLUL 4: MODELAREA CONTACTULUI ROATĂ/ȘINĂ PRIN METODA AEF ÎN REGIM STATIC		77
4.1.	Modelarea contactului Hertzian/Ne-Hertzian, validarea modelelor AEF	77
4.1.1.	Comparații pentru cazul contactului ne-hertzian	77
4.2.	Influența înclinării șinei asupra stării de tensiuni, deformații, deformații specifice și distribuției de presiuni	78
4.2.1.	Modelul AEF	78
4.2.2.	Rezultate obținute	78
4.2.3.	INFLUENȚA PARAMETRILOR GEOMETRICI ASUPRA STĂRII DE TENSIUNI ȘI DEFORMAȚII	83
4.2.4.	Descrierea problemei	83
4.2.5.	Modelul AEF	83
4.2.6.	Rezultate obținute:	83
4.3.	Starea de tensiuni, deformații, deformații specifice conform modelului de material	90
4.3.1.	Modelul AEF	90
4.3.2.	Rezultate obținute	91
4.4.	Influența proprietăților mecanice ale materialului asupra stării de tensiuni, deformații, deformații specifice și gradientului de presiuni	95
4.4.1.	Descrierea problemei	95
4.4.2.	Rezultate obținute:	95

4.5.	Influența neomogenităților de material a bandajului roții asupra stării de tensiuni și deformații specifice	100
4.5.1.	Descrierea problemei	100
4.5.2.	Rezultatele obținute	100
4.6.	Influența gradientului de temperatură ce apare în timpul fazei de frânare asupra stării de tensiuni și deformații specifice	104
4.6.1.	Descrierea problemei	104
4.6.2.	Rezultate obținute	104
4.7.	Influența variației de temperatură din mediul ambiant asupra stării de tensiuni și Deformații specifice	107
4.7.1.	Modelul AEF	107
4.7.2.	Rezultate obținute	107
4.8.	Influența forței transversale asupra stării de tensiuni, deformații, deformații specifice și gradientului de presiuni	110
4.8.1.	Descrierea problemei	110
4.8.2.	Rezultate obținute	110
4.9.	Concluzii	114
CAPITOLUL 5:	MODELAREA CONTACTULUI ROATĂ/ȘINĂ PRIN METODA AEF ÎN REGIM TRANZITORIU	118
5.1.	Modelarea deplasării roții de vagon de marfă în regim tranzitoriu	118
5.1.1.	Descrierea problemei	118
5.1.2.	Rezultate obținute	118
5.2.	Concluzii	121
CAPITOLUL 6:	MODELAREA DEPLASĂRII BOGHIULUI ÎN ALINIAMENT ȘI ÎNSCRIEREA ÎN CURBE	122
6.1.	Modelarea deplasării în aliniament a boghiului vagonului de marfă	122
6.1.1.	Descrierea problemei	122
6.1.2.	Rezultatele obținute	122
6.2.	Concluzii	123
CONCLUZII GENERALE		124
CONTRIBUȚII PROPRII		127
DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE		129
BIBLIOGRAFIE		130

INTRODUCERE

Mișcarea este elementul esențial al existenței noastre. Dezvoltarea oricărui sistem social este realizat prin mișcare. Deplasarea în spațiu a oamenilor și bunurilor dezvoltă tehnologia transportului și astfel transportul devine fundamental pentru activitățile economice și sociale.

Transportul:

- ajută la integrarea piețelor într-un întreg și stimulează apariția economiei moderne, făcând legătura într-un ansamblu a așezărilor omenești, care se întind pe mii de kilometri;
- conectează centrele de producție industrială și producție agricolă cu piețele de desfacere, precum și cu sursele de materie primă și facilitează astfel dezvoltarea industrială;
- este un criteriu de dezvoltare a civilizației și a bogăției;
- este un instrument strategic în domeniul securității țării.

Ca industrie independentă, transportul își creează propriile produse. Produsele de transport sunt constituite din actul de transport în sine, prin urmare reprezintă rezultatul mișcării în spațiu și în timp al pasagerilor și mărfurilor. Este produs și consumat în același timp. El nu creează produse materiale noi, ci le mută pe cele create de alte ramuri de producție. În consecință, produsele de transport nu implică materii prime proprii.

Tehnologia transportului este un ansamblu sistematizat de cunoștințe, care cuprinde rezultatele științifice și de mijloace tehnice, în vederea punerii în practică a invențiilor și inovațiilor pentru crearea de servicii. Tehnologia transportului se clasifică în patru mari categorii: terestru, aerian, naval și special.

În societatea modernă, transportul de persoane și mărfuri este o provocare zilnică, iar transportul feroviar reprezintă o soluție semnificativă în abordarea acestei provocări. Transportul feroviar este parte a transporturilor terestre, este unul din cele mai viguroase moduri de transport și, în același timp, unul din cele mai utilizate modalități de transport, ocupând în traficul terestru european locul II din punct de vedere al volumului de mărfuri transportate și al numărului de pasageri transportați, (Allen, 2016; "Freight transport statistics - modal split," 2020).

Scopul acestei întreprinderi industriale este transportarea oamenilor și a mărfurilor, în condiții de siguranță maximă și confort, cu un rezultat economic maxim, ecologic, rapid și regulat.

Există argumente solide care susțin dezvoltarea transportului feroviar în detrimentul altor moduri de transport, precum:

- în Uniunea Europeană, emisiile de dioxid de carbon ($\text{CO}_2/\text{t}\cdot\text{km}$) generate de transportul feroviar sunt de aproximativ nouă ori mai reduse decât cele ale transportului rutier, (*The Future of Rail Opportunities for energy and the environment*, 2019);

- transportul feroviar de pasageri implică costuri de aproximativ 4,5 ori mai mici decât transportul rutier și de aproximativ 3,5 ori mai mici decât transportul aerian. Acest fapt permite reducerea tarifelor de transport feroviar pentru majoritatea oamenilor, (Bartz, 2016);

- în România, accidentele cu urmări grave generate de transportul feroviar sunt cu aproximativ 193 ori mai puține decât cele generate de transportul rutier, (*Strategia de dezvoltare a infrastructurii feroviare 2021-2025*, 2020, p. 26);

- transportul feroviar este eficient din punct de vedere energetic din cauza rezistenței reduse la înaintare datorită rostogolirii roților pe șine, care determină și un consum de energie per tonă-km sau per pasager-km de 11 ori mai eficient față de transportul rutier, (*Strategia de dezvoltare a infrastructurii feroviare 2021-2025*, 2020, p. 26);

- influența redusă asupra costului de transport ($lei \cdot t \cdot km$) în raport cu fluctuația prețurilor la carburanți;

- capacitatea de transportare a unui volum mai mare de marfă pe suprafața terestră față de transportul rutier sau transportul aerian;

- capacitatea de a transporta obiecte de dimensiuni mari, care sunt dificil sau imposibil de transportat cu alte moduri de transport;

- crearea infrastructurii pentru transportul feroviar este mult mai ieftină decât cea pentru transportul rutier. Costul unitar pentru reabilitarea refracției liniilor curente și directe este de aproximativ 500.000 de euro per kilometru, fiind de peste 10 ori mai mic decât costul unitar pentru construirea de autostrăzi și drumuri expres, (*Strategia de dezvoltare a infrastructurii feroviare 2021-2025*, 2020);

- potențial de creștere a traficului față de transportul rutier sau aerian;

- fiabilitatea și punctualitatea transportului, datorită rutelor bine definite și a programelor regulate de transport;

- permite livrarea mărfurilor transportate fără întârziere, fiind afectate de condițiile climaterice în mică măsură, în comparație cu transportul rutier și aerian;

- oferă un mediu de transport confortabil (cu scaune mai largi, vagoane cușetă, vagoane restaurant etc. în comparație cu transportul rutier sau aerian);

- calea ferată poate fi accesată de către oameni cu dizabilități sau cu nevoi speciale mai ușor decât alte mijloace de transport, cum ar fi avioanele sau autobuzele;

- trenurile pot transporta o cantitate mare de pasageri și marfă într-un singur tren, ceea ce reduce congestia pe drumurile publice;

- sistemul feroviar garantează siguranța încărcăturii.

Ca principale direcții de cercetare, în ceea ce privește transportul feroviar, se pot enumera următoarele: modernizarea materialului rulant, dinamica materialului rulant, optimizarea structurilor, limitele de siguranță a circulației, perfecționarea echipamentelor și a sistemelor de control al circulației, determinarea cauzelor și influența acestora asupra uzurii/defectelor sistemului roată-șină. Aceste studii se fac cu scopul de a mări viteza de circulație și capacitățile de transportare, care astăzi depășesc în unele țări viteze de 500 km/h și sarcini de 40 tone pe osie, minimizând în același timp cheltuielile de producție, întreținere și reparație.

Sistemul roată-șină este, probabil, cel mai important dintre sistemele feroviare, iar estimarea uzurii/defectării în acest sistem este un domeniu important de studiu, de care depind, în principal, fiabilitatea, stabilitatea, confortul și viteza de circulație al materialului rulant, de asemenea este în strânsă legătură cu planificarea intervențiilor de mentenanță și oferă date pentru modele ce permit o mai bună precizie, proiectare și optimizare a elementelor acestui sistem.

Pentru studiul sistemului roată-șină se impune dezvoltarea modelelor și metodelor teoretice și validarea acestora prin cercetări experimentale în laborator sau/și în situ.

Această lucrare are ca **obiectiv** analiza problemelor curente din domeniul transportului feroviar, cu accent pe mentenanța și diagnosticarea materialelor folosite în contactul dintre roată și șină. În jurul acestei probleme determinante sunt: siguranța circulației (deraiieri, ruperi din materialul șinei și roții), probleme de natură economică (uzura și oboseala de contact, limita de viteză) chestiuni legate de protecția mediului ambiant (zgomot, poluare, etc.). Interacțiunea dintre șină și roată a ridicat, de-a lungul timpului, numeroase întrebări privind cauzele apariției fenomenelor de uzură și de înlăturare a efectelor acestora.

Cu toate acestea, uzura este omniprezentă și trebuie combătută în mod constant. Uzura afectează, în special, părți precum schimbătoarele de cale, șinele și roțile de cale ferată, iar dacă acest proces nu este controlat, consecințele pot fi catastrofale. Înlocuirea unor astfel de componente cu altele noi pot fi costisitoare și dificile în ceea ce privește operațiunile și forța de muncă. Spre exemplu, în întreaga lume, lungimea totală a căilor ferate este de aproximativ 1,37 milioane de kilometri. Prețul mediu al unei tone de șină poate varia între 800 și 1300 de dolari SUA, pentru o șină de tip UIC60 cu o greutate de 60 kg pe metru. Acest lucru înseamnă că, costul total al șinelor folosite la nivel global este estimat între 65 și 107 miliarde de dolari SUA, fără a lua în considerare cheltuielile de transport și construcție a căilor ferate. De asemenea, costurile pot crește semnificativ dacă luăm în calcul prețul osiilor montate, care variază între 1800 și 2100 de dolari SUA în 2021. Cantitatea de osii montate, doar în SUA, depășește 14 milioane de bucăți, ceea ce înseamnă că, costurile totale variază între 25 și 30 miliarde de dolari SUA. Acesta este motivul principal pentru care piesele uzate sunt mai degrabă recondiționate decât înlocuite.

Un rol foarte important în ceea ce privește declanșarea fenomenelor de uzură abrazivă și oboseala de contact la interfața roată-șină îl au: parametrii căii, parametrii materialului rulant și proprietățile materialelor ce se află în contact. Acești parametri definesc tipul contactului, aria de contact, localizarea ariei de contact, distribuția de presiuni și starea de tensiuni/deformații, acestea fiind indispensabile atunci când ne dorim creșterea fiabilității transportului pe șine, reducerea costurilor pentru mentenanță, creșterea sarcinilor pe osie și a vitezelor de circulație, reducerea zgomotului, ș.a.

CAPITOLUL 1: STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII PRIVIND CONTACTUL ROATĂ-ȘINĂ. OBIECTIVELE TEZEI

1.1. INFRASTRUCTURA FERROVIARĂ

Infrastructura feroviară, esențială pentru sistemul de transport pe calea ferată, care trebuie proiectată și construită conform standardelor actuale pentru a asigura siguranța și funcționalitatea liniilor de cale ferată. Obiectivele sale includ asigurarea unei călătorii sigure și fiabile pentru pasageri și mărfuri, precum și o disponibilitate crescută pentru traficul trenurilor.

Profilul transversal mixt al liniei de cale ferată, este prezentat în figura 1.1 în care se evidențiază părțile componente necesare la interacțiunea dintre cele două sisteme: vehicul și cale.

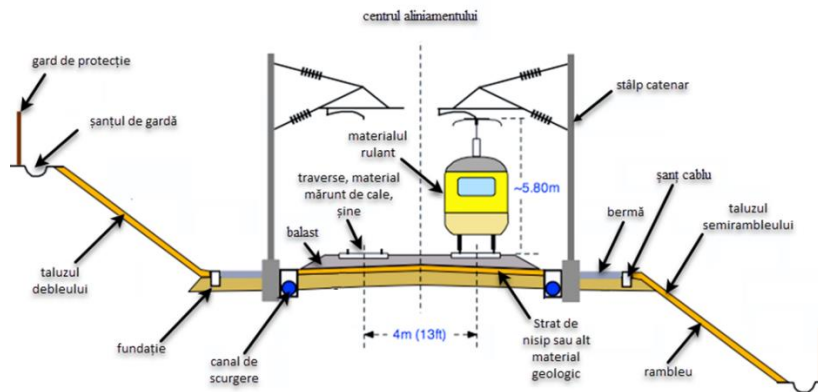


figura 1.1 Profilul transversal mixt al liniei de cale ferată, (Rail Method of Measurement - Detailed Measurement, 2014)

În figura 1.2 este prezentat un model mecanic al sistemului vehicul-cale, evidențiind interacțiunea dintre cele două sisteme fundamentale: vehicul și cale.

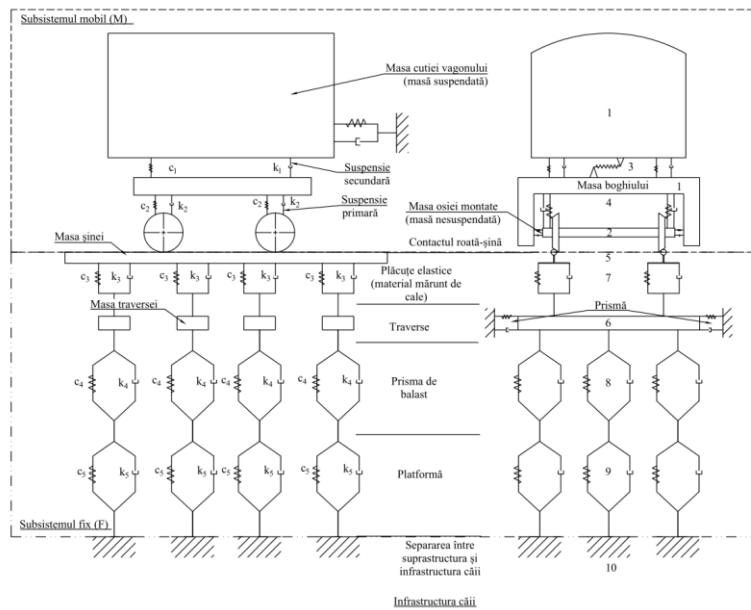


figura 1.2 Reprezentarea schematizată a elementelor sistemului vehicul-cale, (Pipa, 2011)

1.2. SUPRASTRUCTURA CĂII

Suprastructura căii ferate este construită conform unui principiu tehnic care implică o succesiune de elemente, începând cu cele mai rezistente ca șinele, traversele la cele mai puțin rezistente, patul de balast și platforma căii. Aceste elemente suportă sarcini similare, cum ar fi greutatea materialului rulant, distribuită pe suprafețe din ce în ce mai mari, pentru a evita depășirea rezistenței admisibile a materialelor respective, figura 1.3. De exemplu, șinele și aparatele de cale sunt fabricate din oțel aliat, traversele pot fi confecționate din lemn, oțel sau beton armat, patul de balast este format din piatră spartă, iar platforma căii constă în nisip sau alte materiale geologice.

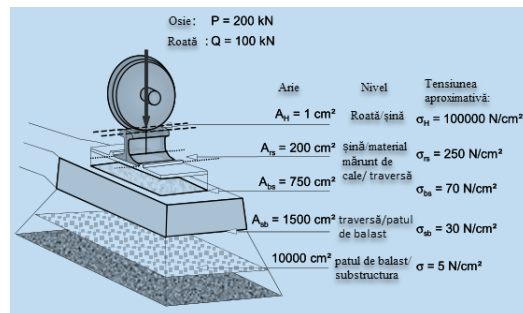


figura 1.3 Distribuția de presiuni de la roată de cale ferată încărcată cu o forță Q , repartizată în sistem pe diverse elemente a suprastructurii căii, (Esveld, 2001)

Șinele din oțel sunt montate pe traverse confecționate din lemn, beton armat sau oțel. Traversele având rolul esențial de a menține distanța între șine (ecartamentul și înclinarea șinei) și de a asigura stabilitatea și durabilitatea liniei de cale ferată. Traversalele sunt plasate pe un strat permeabil alcătuit din piatră spartă, denumit pat de balast, care distribuie uniform presiunile exercitate asupra infrastructurii, asigurând astfel o rezistență adecvată la forțe transversale și longitudinale. Acest strat oferă căii o anumită elasticitate și atenuează vibrațiile la trecerea materialului rulant.

Ecartamentul reprezintă distanța dintre fețele interioare ale șinelor, măsurată la 14 mm de la nivelulul căii pentru ecartamentul normal sau larg. În general, ecartamentul normal este de 1435 mm, fiind cel mai comun și reprezentând aproximativ 60% din lungimea căilor ferate la nivel global.

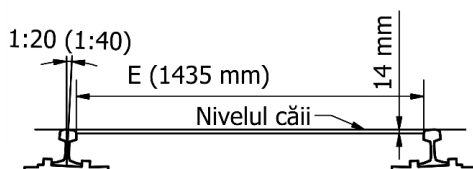


figura 1.4 Ecartamentul căii ferate, caracteristice geometrice

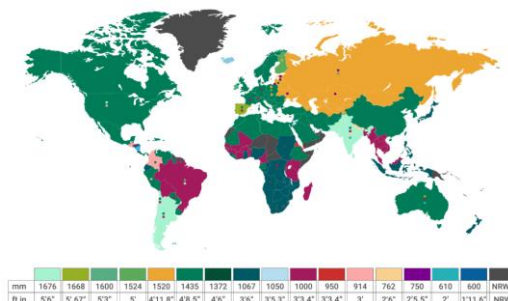


Figura 1.12 Ecartamentul de cale ferată adoptat în diferite țări ale lumii, ("Rail Freight | Overview, Rates and Companies," 2020).

Șinele reprezintă elementele fundamentale ale suprastructurii căii ferate, fiind bare lungi, laminate din oțeluri speciale, cu un profil adaptat rulării materialului rulant pentru o uzură uniformă a roților de tren. Ele trebuie: să susțină și să ghideze roțile materialului rulant, să preia sarcini mari transmise de vehicule și să le distribuie corespunzător pentru a fi preluate de traverse, să preia forțele de tracțiune de la roțile motoare, să aibă o suprafață de rulare cât mai netedă și neîntreruptă pentru a asigura o bună calitate a rulării materialului rulant, (Lichtberger, 2005).

Șinele de cale ferată sunt fabricate prin procesul de laminare din blocuri de oțel 900A, componența chimică este prezentată în ("UIC 860-9ed. Technical specification for the supply of rails," 2008). Elementele chimice care influențează rezistența șinelor este carbonul (C), manganul (Mn) și siliciul (Si) fiind alese optim. Elementele chimice ca nichel, crom, titan, vanadiu, wolfram ș.a. sunt de asemenea benefice, (Скобло, Сапожков, & Сидашенко, 2018). Conținutul de carbon de 0,71- 0,82% este optim, un conținut mai mare, are ca efect creșterea durității și a rezistenței la uzură prin frecare, dar ca efect negativ având și o fragilitate mărită, (Балановский, 2011; Скобло et al., 2018). La fel și prezența în aliaj a elementelor ca fosfor și sulf, conduce la creșterea fragilității, (Скобло et al., 2018), iar conținutul de mangan mai mare de 1,3% duce la o structură neuniformă și la apariția zonei cu martensită, ce nu este permis conform standardelor, (Балановский, 2011). În ceea ce privește siliciul, el duce la creșterea rezistenței și durității oțelului, dar cu toate acestea, este predispus la formarea incluziunilor nemetalice de tip silicat, care are un efect negativ asupra durabilității șinei, (Балановский, 2011).

Tipul șinei reprezintă masa unui metru liniar din șina respectivă (de exemplu: șina tip 49 cântărește 49 kg/m). În România cele mai des răspândite sunt șinele de tip greu: S49, S54, UIC 60, R65.

1.3. MATERIALUL RULANT DE CALE FERATĂ

Structura portantă reprezintă totalitatea componentelor sistemului tehnic al materialului rulant care participă la absorbția solicitărilor datorate de greutate, sarcinile utile și încărcările provenite de la motoare, sistemul de frânare, sistemul de direcție, aparatele de ciocnire și de legare ș.a.

Roțile reprezintă elementele fundamentale ale materialului rulant și trebuie să îndeplinească diverse funcții esențiale: să susțină materialul rulant în poziție verticală, să ofere o calitate optimă a rulării, să aibă o suprafață netedă și fără defecte, să faciliteze accelerarea sau frânarea vehiculului, să se autoghideze în interiorul șinelor și să reziste forțelor de tracțiune în cazul vehiculelor motorizate.

Oțelul R7 este folosit la fabricarea roților pentru toate vagoanele de marfă și aproximativ pentru toate vagoanele de pasageri. Avantajele oțelului R7T sunt: rezistența termomecanică ridicată, un bun comportament la uzură prin abraziune, tendință slabă de amorsare a fisurilor, buna compatibilitate cu instalațiile feroviare și un bun comportament la temperaturi scăzute. Dezavantajele oțelului R7T au fost constatate în exploatare, fiind observate deteriorări ale suprafeței de rulare din cauza

rezistenței mecanice scăzute a materialului și a unei creșteri a: eforturilor de rezemare ale roții, eforturilor de aderență-alunecare, solicitărilor termomecanice alternante și a sensibilității la șocuri termice, (Talambă & Stoica, 2005).

Procesul de fabricare ale roților de cale ferată, cuprinde următoarele procese tehnologice: tăierea semifabricatelor (1); încălzirea semifabricatelor (2); procesul de ștanțare (3); procesul de formare a găurilor (4); procesul de prelucrare a suprafeței roții (5); procesul de forjare (6); procesul de călire (7); diagnoze/testări mecanice (8); strunjirea roții (9); controlul nedestructiv (10).

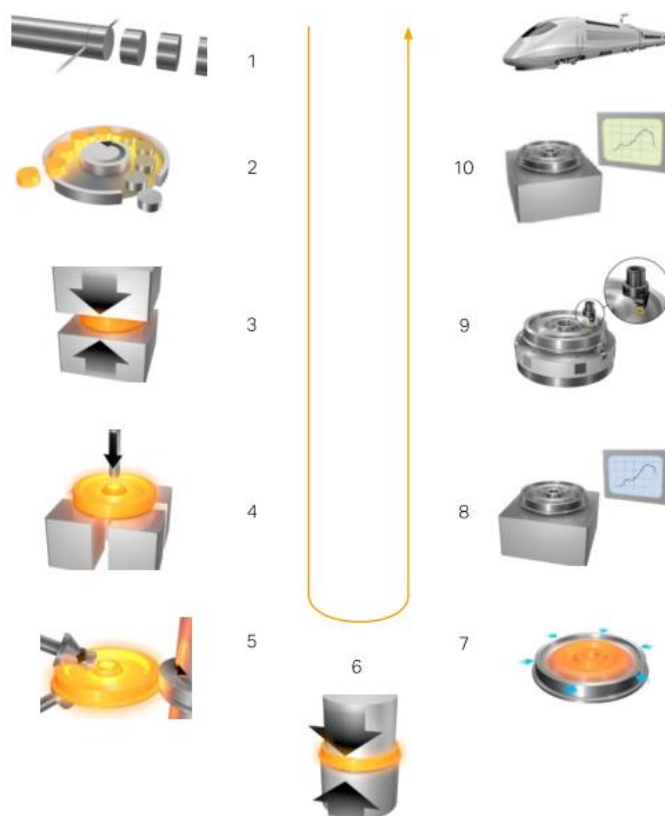


figura 1.5 Procesul tehnologic de producție a roții de cale ferată, ("Drehen von Eisenbahnrädern Radsatz und Neuräderbearbeitung," 2017)

Forma stabilă a profilului de pe suprafața de rulare, determinată în principal de forma și înclinarea șinelor, variind între diferite țări, care a condus la dezvoltarea și adoptarea unor profile de uzură specifice de către fiecare administrație feroviară pentru a satisface cerințele de funcționare ale rețelei proprii de cale ferată. Aceste profile, reglementate conform standardelor internaționale, includ profilul UIC, utilizat pe scară largă în Europa și în alte regiuni, pentru a asigura o funcționare sigură și o uzură uniformă a roților de tren.

În ceea ce privește profilul de uzură a roților, figura 1.6 ilustrează profilul de uzură conform standardului UIC ORE (S1002) utilizat mai des în Uniunea Europeană, în timp ce figura 1.7 prezintă

profilul de uzură S78 folosit în România. Aceste două tipuri de profil de uzură sunt luate ca date de intrare în analizele numerice din capitolele IV-VI.

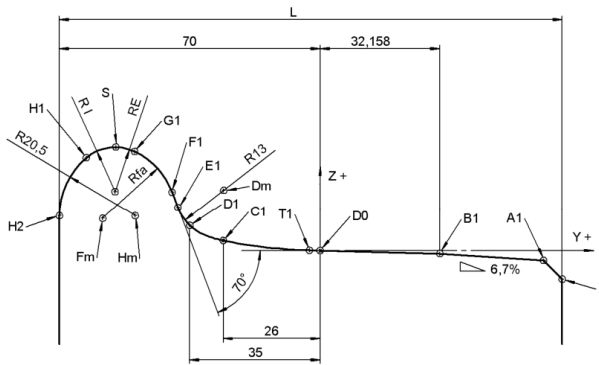


figura 1.6 Profilul S1002, (ASRO, 2011)

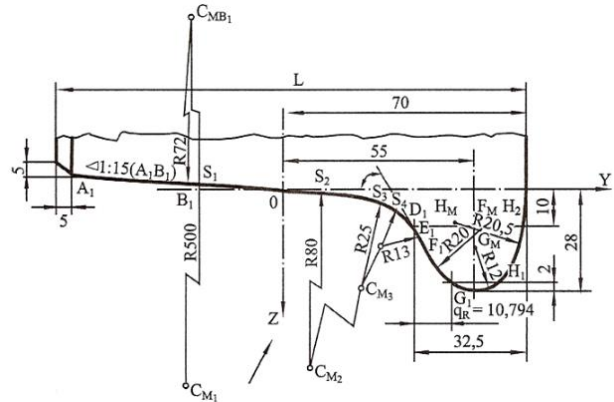


figura 1.7 Profilul S78, (standartizare, 1990)

Durabilitatea roților de cale ferată necesită o atenție specială asupra materialului și procesului de fabricație al acestora (Blarasin și colab.,2001). Tensiunile echivalente von Mises din stratul superficial al roților de cale ferată joacă un rol crucial în declanșarea fenomenelor de oboseală de contact, iar prezența incluziunilor nemetalice în această zonă poate intensifica aceste tensiuni, fiind factori declanșatori pentru formarea fisurilor. Procesul de propagare a fisurilor, cauzate de oboseala de contact în banda de rulare a roților, este explicat în detaliu de (Ekberg, 2001) și de (Kabo și Ekberg, 2002).

1.4. INTERACȚIUNEA ROATĂ-ȘINĂ

1.4.1. Caracteristicile mecanice și geometrice ce definesc interacțiunea roată-șină

Elementele geometrice care definesc contactul roată-cale de rulare întâlnit la vehiculele feroviare sunt prezentate în figura 1.8.

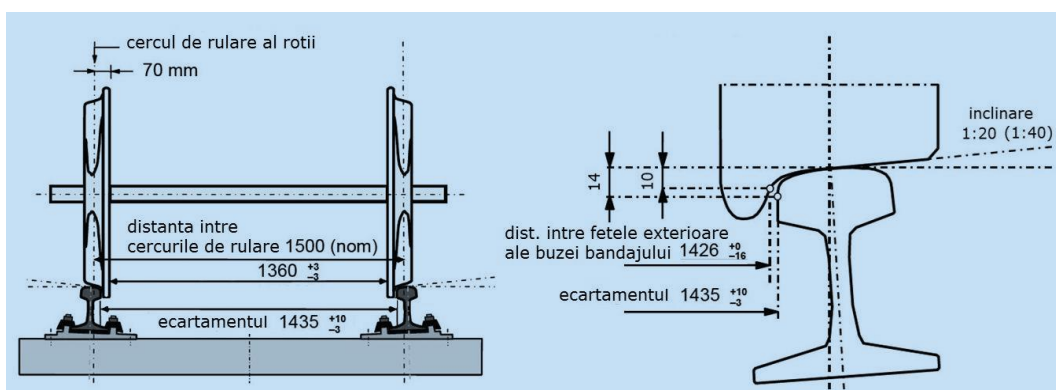


figura 1.8 Elementele geometrice care definesc contactul roată-cale de rulare, (Crețu, 2009)

Prin mișcarea de șerpuire, care are loc pe porțiuni cu curbă sau denivelări, poziția boghiului față de calea ferată se schimbă, ceea ce duce la modificarea poziției roții pe șină și apariția unor tipuri diverse de contact între ele. Aceste interacțiuni sunt denumite contacte de tip ne-hertzian, așa cum se poate vedea în figura 1.9.

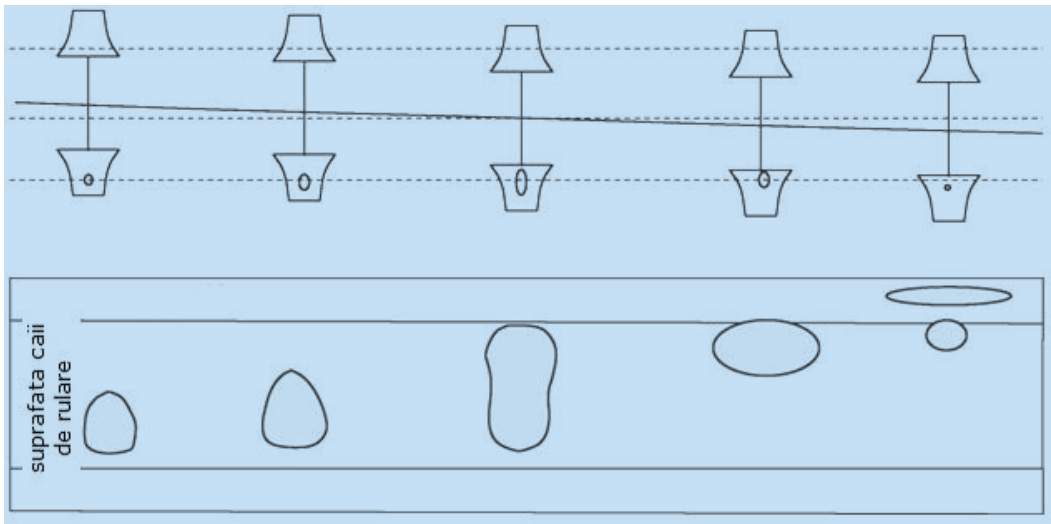


figura 1.9 Contactul ne-hertzian roată-șină de cale ferată, (Crețu, 2009)

1.4.2. Forțe care interacționează la contactul roată-șină

Interacțiunea roată/șină este realizată și pe suprafețe neconforme, ce include încărcări pe direcția normală și tangențială, figura 1.10. Încărcarea tangențială este dependentă de regimul de frecare-ungere din zona de contact, figura 1.22, (Crețu, 2009).

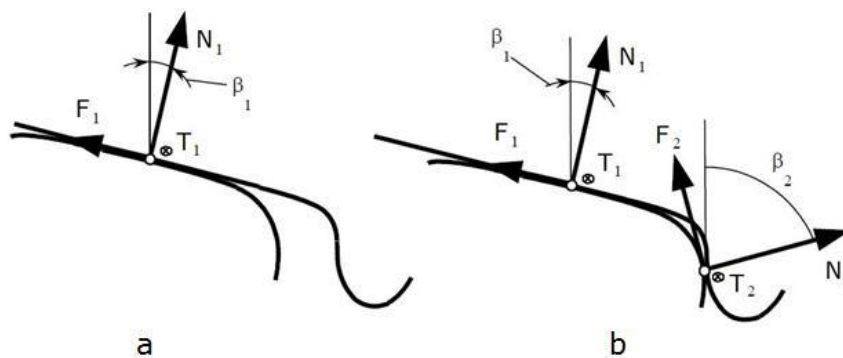


figura 1.10 Sarcini pe direcția normală, tangențială și longitudinală, (Crețu, 2009)

Sistemul de forțe ce se dezvoltă în contactul roată/șină este prezentat în figura 1.10. În figura 1.10 (a) sunt prezentate forțele dezvoltate în cazul contactului punctual, iar în figura 1.10 (b), pentru cazul contactului realizat în două puncte.

Figura 1.14 sunt prezentate cauzele tipice și formele de uzură a suprafeței laterale a ciupercii șinei în curbe. Apariția forțelor normale și tangențiale pe buza roții duce la micșorarea sarcinii verticale în zona de contact și forțează escaladarea roții pe șină și posibilitatea de deraiere a materialului rulant.

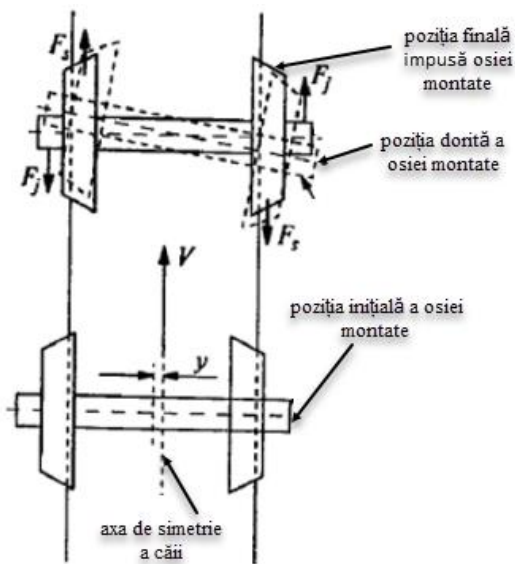


figura 1.11 Alunecarea osiei montate în poziție longitudinală la mișcarea în aliniament, (Балановский, 2011)

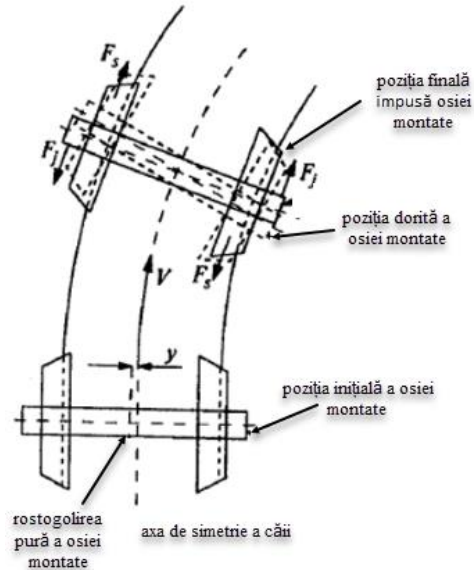


figura 1.12 Alunecarea osiei montate în poziție longitudinală la mișcarea în curbă, (Балановский, 2011)

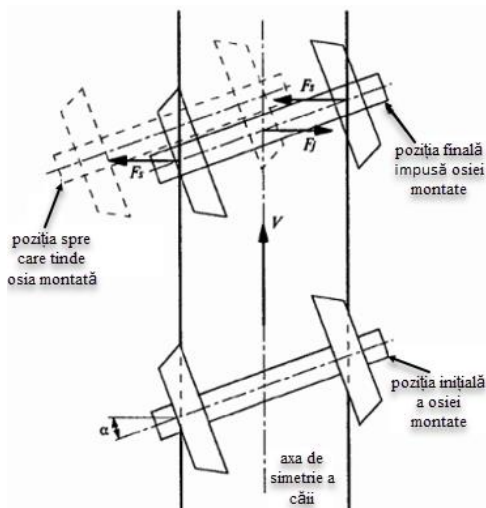


figura 1.13 Alunecarea osiei montate în poziție transversală la mișcarea în aliniament, (Балановский, 2011)

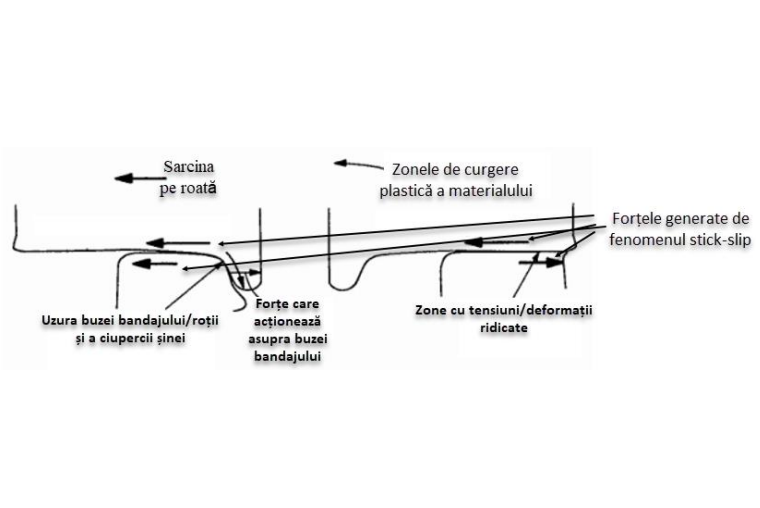


figura 1.14 Uzura și deformarea plastică a șinei și roții de cale ferată la rostogolirea/alunecarea suprafeței roții de cale ferată, (Балановский, 2011)

Alte forțe, la fel, acționează asupra osiei montate și asupra șinei. Forțele generate de fenomenul de alunecare-rostogolire la pivotare și de gravitație, de asemenea, acționează asupra osiei montate, de obicei în mai mică măsură decât cele analizate mai sus, și nu joacă un rol important în siguranța traficului feroviar.

1.4.3. Distribuția de presiuni în cazul contactului roată-șină

Pentru determinarea formei și ariei de contact pentru doi cilindri aflați în contact, Heinrich Hertz, (Hertz, 1881), a considerat ipotezele: modelul de material elastic; deplasările și tensiunile au

caracter local; forma distribuției de presiuni are forma elipsoidală; separarea dintre obiecte este nulă în interior și pozitivă spre exterior; contact fără frecare; forța normală este egală cu integrala pe aria de contact.

Ipoteza că distribuția de presiuni dintre roată și șină are o formă eliptică și că forța normală este egală cu integrala pe aria de contact, a permis determinarea dimensiunilor semiaxelor elipsei și a presiunii maxime în contact. Această ipoteză se aplică numai atunci când separarea dintre suprafețe poate fi redusă la o formă pătratică în jurul punctului inițial de contact, iar generatoarea comună este de lungime infinită. În caz contrar, geometria de contact este ne-Hertziană, iar rezolvarea acestor scenarii se poate face numeric prin metoda cu elemente finite sau cu ajutorul altor metode numerice dedicate.

Atunci când doi cilindri intră în contact fără a fi supuși sarcinilor, atingerea are loc într-un punct sau după o linie. Însă, în prezența unei sarcini, punctul și linia de contact se transformă într-o arie comună de contact și poartă denumirea de contact concentrat punctual și liniar.

În lumea reală, toate suprafețele sunt rugoase și forțele nu sunt aliniate perfect pe normală, așa că orice contact real depășește cadrul contactului hertzian. În acest caz, pentru a calcula aria de contact, distribuția de presiuni, starea de tensiuni, starea de deformații specifice și starea de deformații la contacte de tip ne-Hertz, se utilizează metode numerice precum: metoda elementului finit (FEM), metoda Fourier Fast Transform (FFT), metoda gradientului conjugat (GC), metode multilevel și multigrad, sau metoda coeficienților de influență.

Un avantaj esențial al studiului problemelor de contact prin metoda elementelor finite, cu utilizarea de programe AEF, îl reprezintă posibilitatea de a studia fenomenul în multitudinea de variații și de a crea diferite scenarii care implică zeci de parametri, și de a analiza cum acești parametri influențează toată structura; în schimb, cu cât structura este mai complicată ea necesită o discretizare cu un volum de elemente mai mare și astfel crește timpul de calcul. Un dezavantaj al programelor dedicate îl reprezintă imposibilitatea de a studia influența încărcărilor pe toată structura, necesitând introducerea de noi parametri care să cuprindă și să modifice programul, și imposibilitatea de a crea scenarii realiste, în schimb obținem un rezultat într-un timp scurt, sau, luând în considerare resursele de calcul contemporane, rezultate online.

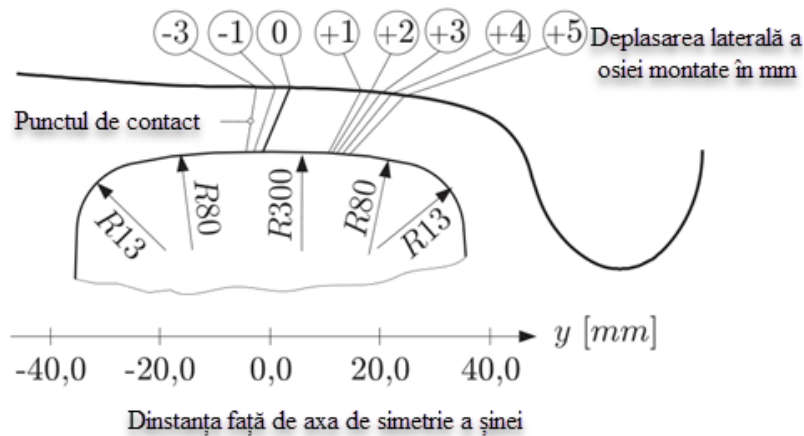


figura 1.15 Deplasarea laterală a osiei montate față de șină funcție de raza curbei, (DAMME, 2006)

În ceea ce privește distribuția de presiuni la contactul roată - șină, pentru următoarele date de intrare: modulul de elasticitate longitudinal: $2.1 \cdot 10^5$ MPa, coeficientul de contracție transversală: 0.28, sarcina pe roată 90 kN, profilul roții: S1002, profilul șinei: UIC60, înclinarea șinei: 1/40, ecartamentul: 1435 mm, distanța dintre fețele interioare ale celor două roți: 1360 mm, raza roții: 460 mm, deplasarea laterală a osiei montate: 0 mm, unghiul de atac: 0° , frecările se consideră nule pe direcție longitudinală și transversală, au fost studiate de Damme (DAMME, 2006) prin metoda elementului finit și comparate cu rezultatele obținute cu ajutorul programului CONTACT, figura 1.16 și figura 1.17.

Rezultatele obținute pentru diverse deplasări laterale ale osiei montate prin metoda AEF sunt prezentate în figura 1.17. Modificarea poziției în plan transversal a osiei montate înseamnă modificarea geometriei locale de contact, cu implicații asupra ariei de contact și distribuției de presiuni.

S-au obținut rezultatele cu erori esențiale între aceste două metode, atât în valori obținute cât și în forma distribuției de presiuni, care pot fi cauzate de metoda de penalizare utilizată în formularea AEF, ce permite o anumită penetrare a obiectelor, la care scade rigiditatea de contact. Un alt motiv ar putea fi legat de ipoteza semi-spațiului, în soft-ul CONTACT, ce presupune că suprafața de contact este plană (ca o consecință a presupunerii semispațiului). Cu toate acestea, în analiza MEF, suprafața de contact nu este neapărat plană și este puțin mai înclinată la capătul drept al suprafeței, unde putem observa valori mai mici ale presiunii în comparație cu soluția oferită de softul CONTACT.

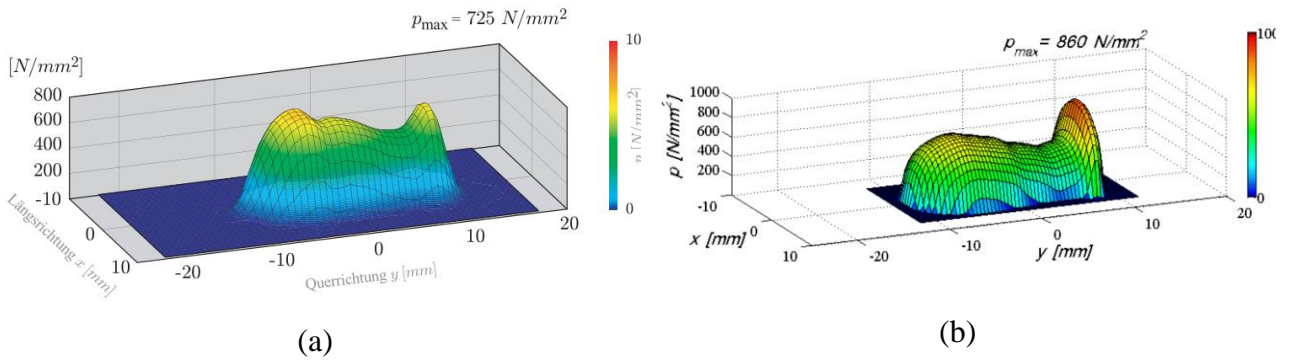


figura 1.16 Forma, aria și distribuția de presiuni la contactul roată/șină pentru deplasarea osiei montate la 0 mm, (DAMME, 2006)

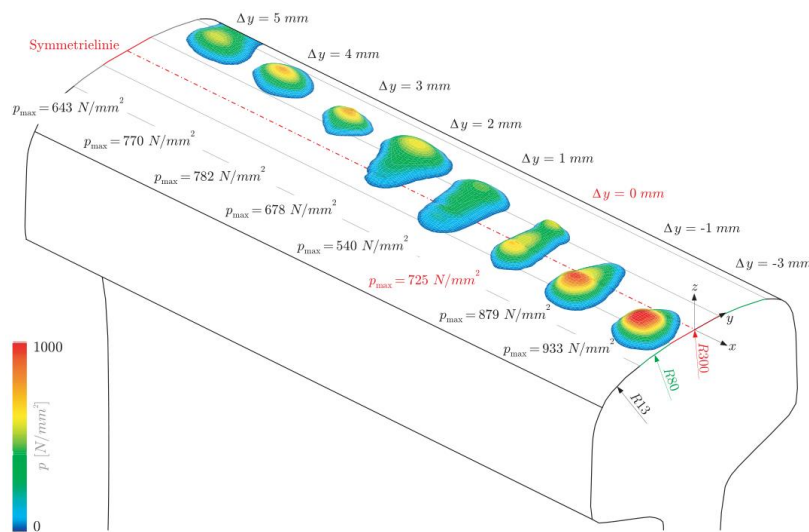
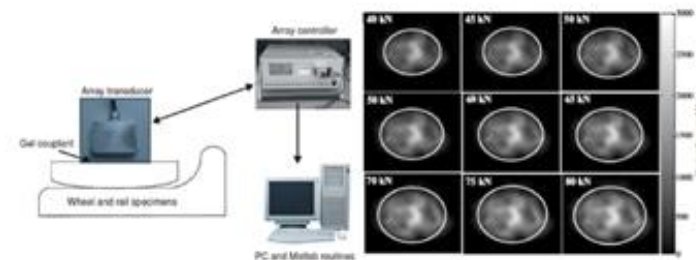


figura 1.17 Forma, aria și distribuția de presiuni la contactul roată/șină pentru deplasarea osiei montate, (DAMME, 2006)

Pe cale experimentală a fost determinată aria de contact și distribuția de presiuni folosind un aparat de scanare cu ultrasunete, pentru diferite scenarii de interacțiune dintre fragmente extrase din roată și șină, (Dwyer-Joyce, Yao, Zhang, Lewis, & Drinkwater, 2009; Marshall, Lewis, Dwyer-Joyce, Olofsson, & Björklund, 2004). Principiul de funcționare și rezultatele obținute sunt prezentate în figura 1.18, (Dwyer-Joyce et al., 2009).



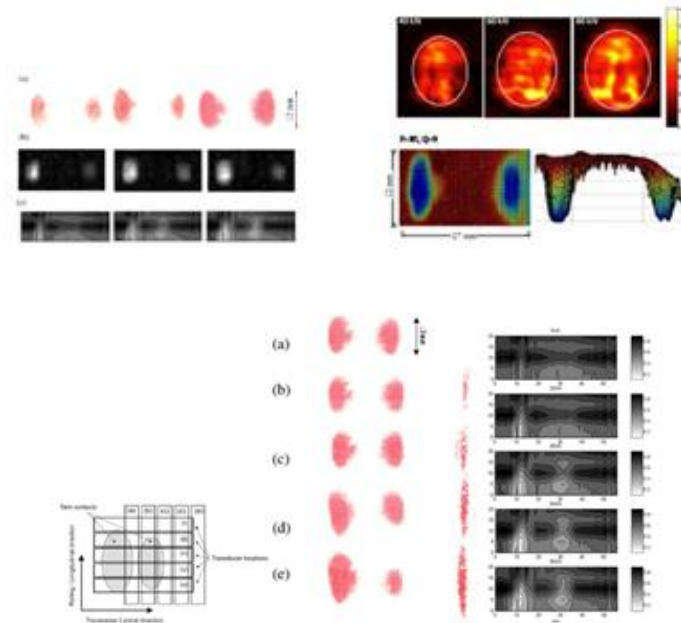


figura 1.18 Determinarea distribuției de presiuni și aria de contact dintr-un fragment extras din roată și șină folosind aparatul de scanare cu ultrasunete, (Dwyer-Joyce et al., 2009)

1.4.4. Starea de tensiuni la contactul roată - șină

Starea de tensiuni la contactul roată-șină este o problemă complexă și depinde de multe variabile, cum ar fi geometria roții și a șinei, distribuția de presiuni, materialele aflate în contact și proprietățile lor mecanice, sarcina care acționează asupra roții, viteza de deplasare, rugozitatea suprafețelor, etc. În general, se consideră că în zona de contact dintre roată și șină apar tensiuni de compresiune, iar în afara acestei zone apar tensiuni de tracțiune.

În cazul contactului hertzian, tensiunile maxime apar în zona de contact maximă dintre roată și șină, iar acestea sunt, de obicei, de ordinul sutelor sau a miilor de MPa. În zona de contact minimă, tensiunile sunt mult mai reduse. În general, se consideră că tensiunile de compresiune din zona de contact au un efect pozitiv asupra duratei de viață a materialului, deoarece ajută la prevenirea apariției fisurilor și la prevenirea degradării premature a suprafețelor.

Pentru a evalua starea de tensiuni la contactul roată-șină, se pot folosi metode numerice precum metoda elementelor finite (FEM), care permite simularea interacțiunii dintre roată și șină sub diferite condiții de încărcare și parametri. Aceste simulări pot fi utilizate pentru a optimiza geometria roții și a șinei, pentru a reduce uzura și a crește durata de viață a materialului.

În lucrarea (DAMME, 2006) a fost obținută starea de tensiuni echivalente von Mises la contactul roată-șină, folosind metoda elementelor finite, pentru următoarele date de intrare: modulul de elasticitate longitudinal: $2.1 \cdot 10^5$ MPa, coeficientul de contracție transversală: 0.28, sarcina pe roată 90 kN, profilul roții: S1002, profilul șinei: UIC60, înclinarea șinei: 1/40, ecartamentul: 1435 mm, distanța dintre fețele interioare ale celor două roți: 1360 mm, raza roții: 460 mm, deplasarea laterală

a osiei montate: 0 mm, unghiul de atac: 0°, frecările considerându-se nule pe direcție longitudinală și transversală, figura 1.19.

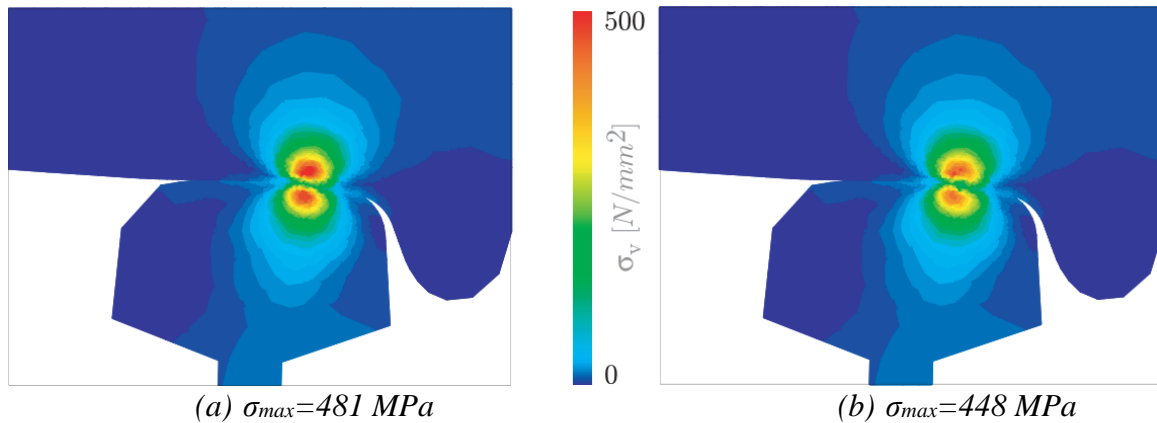


figura 1.19 Starea de tensiuni la contactul roată/șină pentru un profil de uzură nou (a), profilul de uzură uzat (b), (DAMME, 2006)

În lucrarea (Johansson et al., 2010) a fost obținută starea de tensiuni echivalente von Mises la trecerea roții de cale ferată peste aparatul de cale, folosind metoda elementelor finite, figura 1.20.

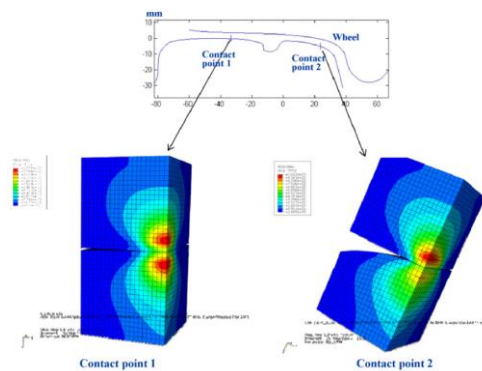


figura 1.20 Contactul în două puncte la trecerea roții de cale ferată peste schimbătorul de cale, (Johansson et al., 2010)

Pe cale experimentală s-au obținut starea de tensiuni echivalente la contactul dintre un cilindru și un paralepiped folosind fotoelasticitatea, figura 1.21, (Guagliano, Sangirardi, & Vergani, 2008).



figura 1.21 Izocromate obținute la contactul roată – șină de calea ferată în prezența concentratorului de tensiune, (Guagliano et al., 2008)

1.4.5. Fenomene de frecare la interfața roată-șină

Frecarea este un fenomen fizic care apare atunci când două suprafețe sunt puse în contact și se mișcă una față de cealaltă. În timpul mișcării, suprafețele se freacă una de cealaltă și apare o rezistență la mișcare, ceea ce denumim frecare.

Există două tipuri principale de frecare: frecarea statică și frecarea dinamică. Frecarea statică apare atunci când două suprafețe sunt în contact, dar nu se mișcă una față de cealaltă. Această formă de frecare poate fi depășită prin aplicarea unei forțe suficient de mari care să înceapă mișcarea suprafețelor. Frecarea dinamică, pe de altă parte, apare atunci când două suprafețe sunt în mișcare relativă una față de cealaltă.

Contactul neconform de tip hertzian consideră anumite ipoteze: coeficientul de frecare este egal cu zero; sarcina între corpuri este pe direcție normală; lipsa asperităților, (Crețu, 2009).

Coeficienții de frecare care intervin la calculul forțelor transversale și longitudinale depind de tipul de contaminare, zona de contact, forța de tracțiune și de direcția forței de frecare, (Crețu, 2009).

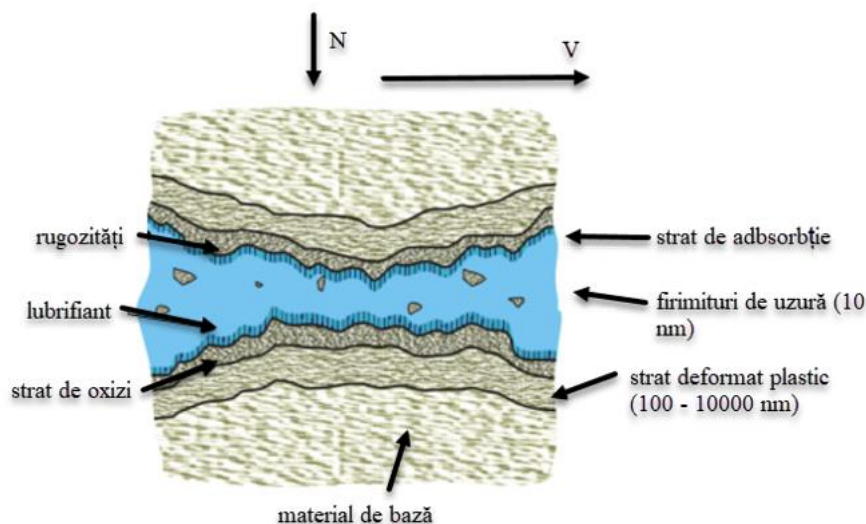


figura 1.22 Structura contactului cu frecare

Dacă avem un coeficient de frecare mai mic decât 0,25 pentru criteriul Tresca și 0,3 pentru criteriul von-Mises, atunci se atinge limita de curgere și materialul se deformează plastic. În cazul în care coeficientul de frecare depășește limitele menționate mai sus, atunci, la sarcini normale mai mici, se va atinge această limită, iar punctul maxim se va apropia de suprafața de contact.

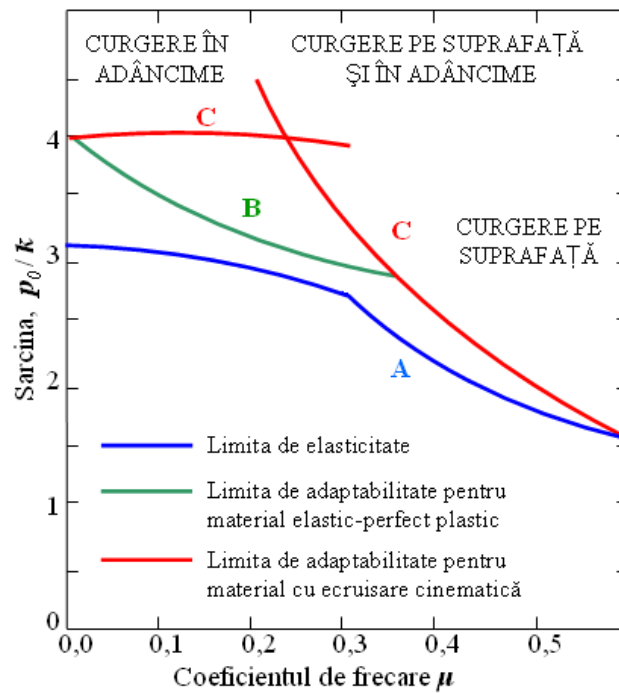


figura 1.23 Dependența limitei de adaptabilitate de valoarea coeficientului de frecare, (C. I. Bărbînță, 2014; Greenwood & Johnson, 1992)

figura 1.23 prezintă dependența limitei de adaptabilitate de valoarea coeficientului de frecare. Limita de elasticitate și atingerea limitei de curgere a materialului la prima încărcare sunt reprezentate de curba A, în timp ce curba B prezintă valorile critice ale intensității de solicitare care corespund limitei de adaptabilitate. Domeniul cuprins între curbele A și B reprezintă câștigul posibil determinat de procesul de adaptabilitate. Curba C reprezintă determinarea limitei de adaptabilitate la solicitarea obiectelor prin contact în prezența frecării materialelor cu ecrusare cinematică, conform procedului descris de (Greenwood & Johnson, 1992).

În ceea ce privește coeficienții de frecare la contactul roată/șină, aceștia au fost determinați prin experimente în laborator și în situ prin metoda descrisă de (Popovici, 2010). figura 1.24 prezintă valorile coeficientului de frecare în funcție de alunecare, în timp ce figura 1.25 prezintă probabilitatea distribuției coeficientului de frecare.

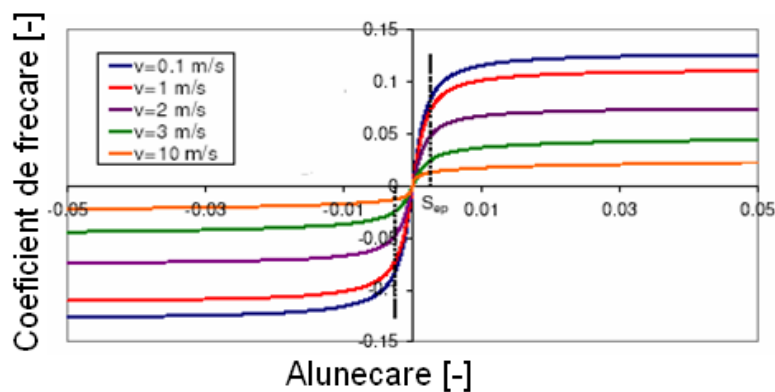


figura 1.24 Curba de tracțiune, (Popovici, 2010)

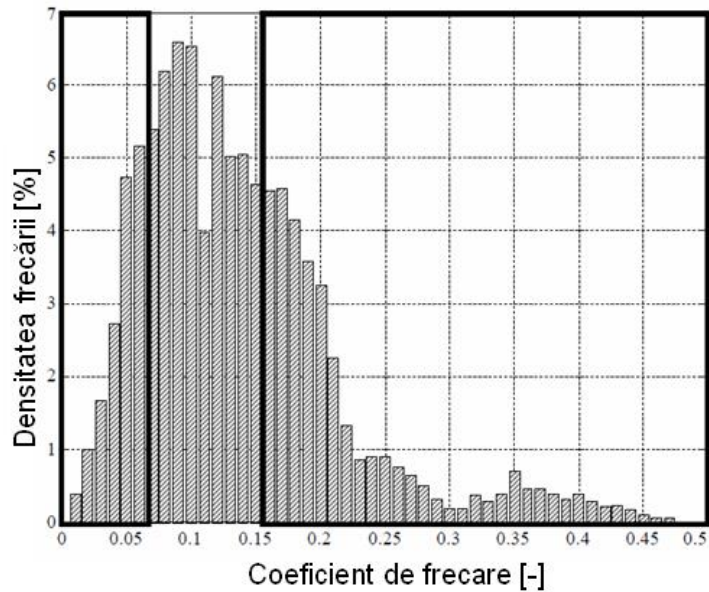


figura 1.25 Probabilitatea distribuției coeficientului de frecare în situ, (Popovici, 2010)

1.4.6. Rugozitatea roților și șinelor de cale ferată

Evoluția rugozităților pentru o șină rectificată în funcție de intensitatea mișcării este prezentată în figura 1.26.

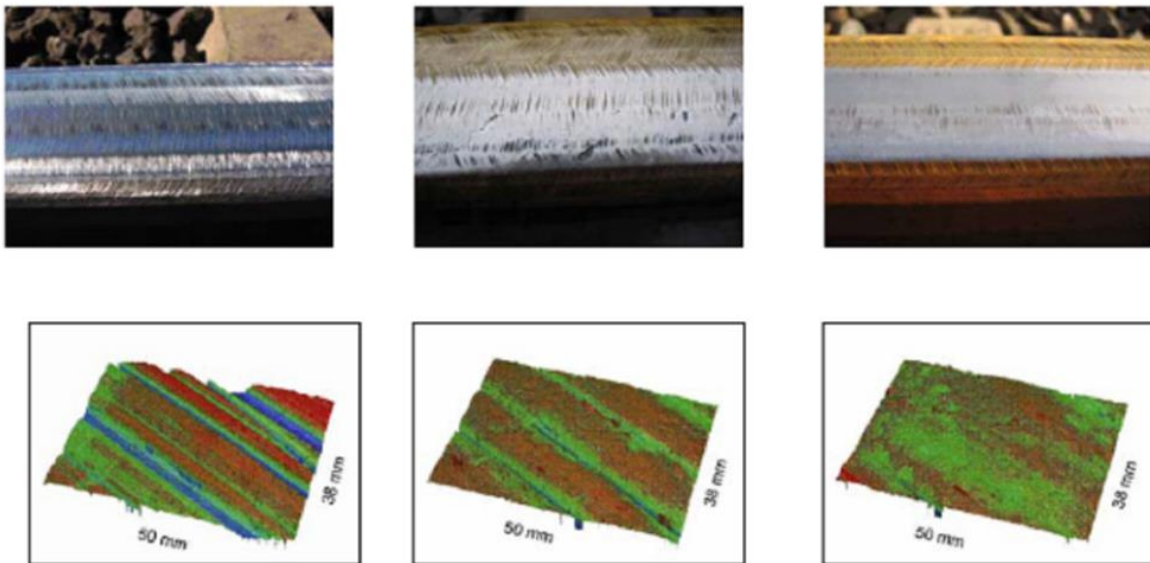


figura 1.26 Modificarea topografiei suprafeței șinei în funcție de intensitatea mișcării: stânga – șină rectificată; mijloc – după 1,5 zile și încărcarea de 26800 tone; dreapta – după 10 zile de parcurs și încărcarea de 259000 tone, (Балановский, 2011)

C. I. Bărbîntă, 2014 a dezvoltat un algoritm capabil să determine distribuția de presiuni și tensiuni la contactul roată/șină cu profile S1002 pentru roată și pentru șină UIC60 folosind simularea trigonometrică - stohastică a rugozităților suprafețelor cu parametri de rugozitate $R_a = 12\mu\text{m}$ și panta de $5,7^\circ$, modelul de material fiind elastic-perfect plastic. Rezultatele obținute sunt prezentate în figura 1.27 și figura 1.28.

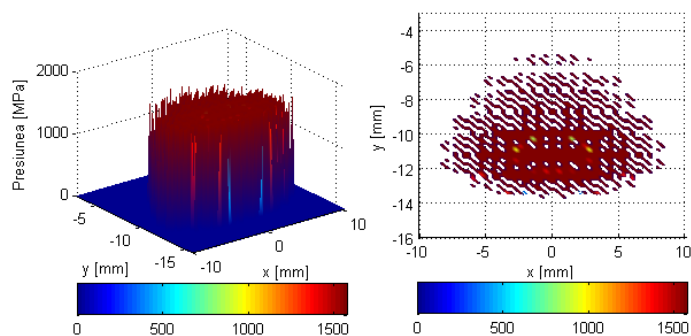


figura 1.27 Distribuția de presiuni la contactul rugos roată/șină, (C. I. Bărbîntă, 2014)

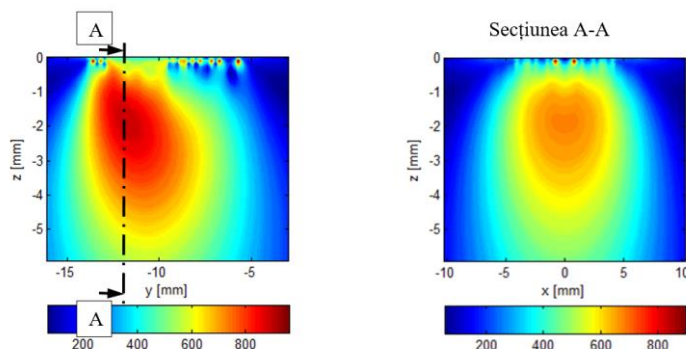


figura 1.28 Starea de tensiuni la contactul rugos roată/șină, (C. I. Bărbîntă, 2014)

1.4.7. Factorii care influențează aderența la contactul roată-șină

În general, coeficientul de aderență la contactul roată-șină variază în domeniul 0,05 – 0,6. Pentru îmbunătățirea proprietăților de tracțiune și frânare a locomotivelor s-au propus diverși modificatori de frecare precum: material care conține 2-30% sticlă, 3-25% ciment, 0,5-50% bitum, 0-30% grafit, 0-75% nisip, 1-20% permanganat de potasiu, 0,5-23% glicerină, 0,5-30% % aditiv EP, cum ar fi bi-sulfura de molibden, 0,5-30% aditiv anti-frecare, cum ar fi polietilena, 0,5-30% aditiv de placare, cum ar fi pulberea de cupru și solventul hi-drocarburic echilibrat, (Shapovalov et al., 2004), prin care se obține coeficientului de frecare minim de 0,15 și se stabilizează la valoare maximă de 0,55 pe o perioadă de timp 20-30s; material cu o compoziție chimică formată din praf de sticlă de spumă care este 100% aceeași cu compoziția chimică a spumei de sticlă clasică și care mai include oxizi de siliciu, calciu, sodiu, mangan, aluminiu, ce nu reprezintă o amenințare pentru mediu ambiant, (Шаповалов Владимир Владимирович, Майба Игорь Альбертович, Вялов Сергей Алифтинович, Глазунов Дмитрий Владимирович, & Михайлович, 2009), ce oferă un coeficient stabil de minim 0,25 și maxim de 0,5.

Prin analizarea unui număr mare de lucrări, care și-au propus să dezvăluie natura aderenței dintre roată și șina de cale ferată, s-au identificat aproximativ șaiszeci de factori care pot influența acest fenomen. Desigur, există factori care au o influență mai mare și alți factori care au o influență mai mică. Pentru a oferi o evaluare unică a gradului de influență a diferiților factori asupra aderenței roților cu șinele de cale ferată, au fost realizate o serie de cercetări printre cele mai cunoscute, iar

(Лужнов, 2003) a realizat un clasament cuprinzând douăzeci de factori indicați în treizeci și cinci de lucrări.

figura 1.29 prezintă factorii analizați și influența lor asupra aderenței dintre roată și șina de cale ferată. Rezultatele sunt bazate pe datele publicate în monografii, lucrări științifice și proiecte de cercetare, precum și pe rezultatele prelucrării statistice a datelor analizate. Codificarea a fost realizată în două etape. În prima etapă, a fost compilată o secvență a semnificației factorilor în ordinea descrescătoare a influenței lor asupra aderenței. Fiecare factor este indicat prin două simboluri: primul este același pentru toți, iar al doilea este numărul ordinal al scăderii influenței sale. Rezultatele primei etape au relevat următoarea secvență de influență a factorilor asupra aderenței: X1 - micro-geometria suprafeței de contact a roții și a șinei; X2 - zona de contact reală; X3 - profilul roții și șinei; X4 - duritatea subiacentă suprafeței de rulare a materialelor roților și șinelor, tipul de contact (elastic sau plastic); X5 - presiunea de contact; X6 - proprietățile fizico-chimice și de frecare ale suprafeței straturilor de contaminare; X7 - condițiile de mediu; X8 - viteza locomotivei; X9 - viteza de alunecare a roții față de șină; X10 - grosimea stratului subiacent suprafeței de rulare și tipul de contact; X11 - procesele termo-fizice în suprafața subiacentă suprafeței de contact; X12 - procese electrice ce au loc în zona de contact; X13 - deplasarea elastică preliminară a materialului roții față de materialul șinei; X14 - intensitatea deformării stratului de suprafață; X15 – distribuția neuniformă a greutateii locomotivei pe osiile montate și pe fiecare roată în parte în regimul de tracțiune și frânare; X16 - natura legăturii dintre perechile de roți; X17 – diferențele între caracteristicile de tracțiune ale motoarelor de locomotivă; X18 - diferențele între diametrele roților cu aceeași osie montată; X19 - influența elasticității neuniforme a căii și vibrațiile trenului în rulare; X20 - proprietăți fizice și mecanice ale particulelor abrazive în zona de contact a roții cu șina.

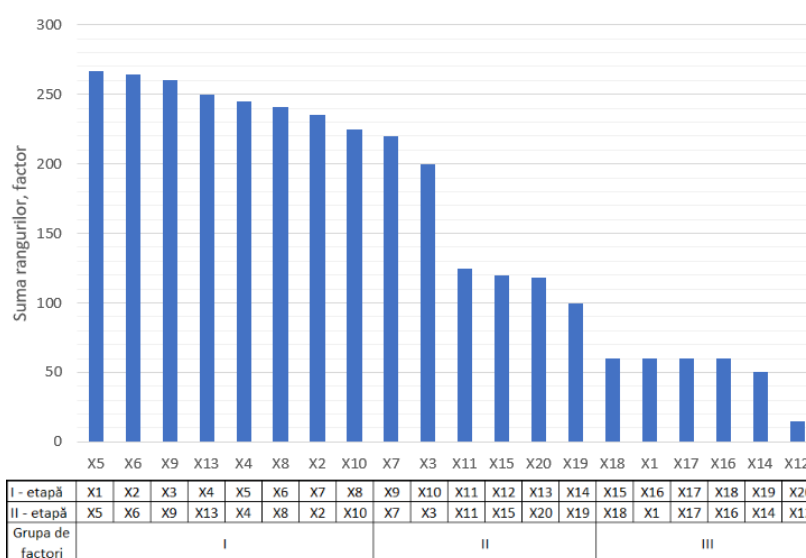


figura 1.29 Rezultatele codificării factorilor, care influențează procesul de aderență dintre roată și șină de cale ferată, (Лужнов, 2003)

În etapa a doua a cercetării, metoda evaluărilor de către experți a fost cea a corelării rangului pentru a stabili coerența opiniilor autorilor publicațiilor referitoare la influența factorilor asupra aderenței roții pe șină. Potrivit cercetării realizate de (Лужнов, 2003), cu un nivel de încredere de 96%, este posibil să argumentăm că acordul dintre opiniile autorilor nu este întâmplător. Factorii au fost clasificați în trei grupe: I - cu o influență mare, II - cu o influență semnificativă și III - cu o influență nesemnificativă. Semnificația factorilor a scăzut în ordinea următoare: 1 - presiunea în contactul roții și a șinei (X5), 2 - proprietățile fizico-chimice și de frecare ale stratului de suprafață și poluare (X6), 3 - viteza de alunecare a roții de-a lungul șinei (X9), 4 - deplasarea elastică preliminară a materialului roții față de materialul șinei (X13), 5 - duritatea suprafeței materialelor roților și șinelor, tip de contact - elastic sau plastic (X4), 6 - viteza locomotivei (X8), 7 - zona de contact reală (X2), 8 - grosimea stratului subiacent suprafeței de rulare și tipul de contact (X10), 9 - condițiile de mediu (X7), 10 - profilul roții și a șinei (X3), 11 - procesele termo-fizice în suprafața subiacentă suprafeței de contact (X11), 12 - distribuția neuniformă a greutateii locomotivei pe osiile montate și pe fiecare roată în parte în regimul de tracțiune și frânare (X15), 13 - proprietăți fizice și mecanice ale particulelor abrazive în zona de contact a roții cu șina (X20), 14 - influența elasticității neuniforme a căii și vibrațiile trenului în rulare (X18), 15 - diferențele între diametrele roților aparținând aceleași osii montate (X19), 16 - micro-geometria suprafeței de contact a roții și a șinei (X1), 17 - diferențele între caracteristicile de tracțiune ale motoarelor de locomotivă (X17), 18 - natura legăturii dintre perechile de roți (X16), 19 - intensitatea deformării stratului de suprafață (X14) și 20 - procesele electrice ce au loc în zona de contact (X12).

Este interesant faptul că rugozitatea suprafețelor ce se află în contactul dintre roată și șină, unul dintre factorii principali în prima etapă, a ajuns în grupul nesemnificativ.

În consecință, factorii analizați au fost clasificați în trei grupe: I – cu o influență mare (X5, X6, X9, X13, X4, X8, X2, X10, X7, X3); II – cu o influență semnificativă (X11, X15, X20, X19); III – cu o influență nesemnificativă (X18, X1, X17, X16, X14, X12).

Aderența este esențială pentru siguranța și eficiența transportului feroviar. Fără o aderență adecvată între roata trenului și șină, trenurile nu ar putea să se deplaseze la viteze ridicate, să accelereze sau să frâneze în siguranță și ar exista riscul de deraiere. De aceea, aderența este un factor important în proiectarea și construcția de locomotive și material rulant, precum și în mentenanța și operarea acestora. Îmbunătățirea aderenței poate duce la o eficiență mai mare a tracțiunii și la o mai mare economie de energie, precum și la o siguranță mai mare în exploatarea trenurilor.

Analiza factorilor ce influențează aderența roții și a șinei de cale ferată permite stabilirea direcțiilor ulterioare de cercetare în vederea determinării metodelor mai eficiente la stabilizarea aderenței și îmbunătățirea proprietăților de tracțiune și frânare a locomotivelor.

1.5. DEFECTE ALE ROȚII ȘI ȘINEI DE CALE FERATĂ

1.5.1. Defectele șinelor

1.5.1.1. Cauze care contribuie la apariția defectelor

Se pun în evidență 8 cauze principale:

- materialul inadecvat folosit la construcția suprastructurii căii;
- defecte provenite din procesul de fabricare a șinelor;
- schimbări bruște a temperaturii, pe timp de iarnă care pot ajunge la temperaturi de -30 °C, iar pe timp de vară la +50 °C;
- așezarea liniei inadecvate de la bun început;
- întreținerea neglijentă a căilor ferate;
- micșorarea duratei de viață la oboseală din cauza interacțiunii roată/șină;
- contaminarea contactului cu diferite materiale terțe, în special: nisip, frunze, praf și altele care conduc la aderență scăzută sau ridicată și care pot influența semnificativ uzura șinelor și siguranța traficului;
- impactul negativ al materialului rulant aflat în mișcare, în special în timpul frânării/accelerării, deplasării la viteze mari, repartizarea neuniformă a încărcăturii pe osie și defectele pe suprafața de rulare pe bandaj/roată.

Probabilitatea de apariție a defectelor poate fi calculată pe baza tonajului scurs pe linie (tone · km), tone pe osie, viteza de deplasare a trenului. De asemenea, anotimpul are un impact semnificativ asupra durabilității, de exemplu: iarna, numărul de defecte crește de aprox. 2-3 ori în comparație cu perioada de vară. Acest lucru se datorează creșterii fragilității și scăderii rezistenței la încovoierea prin șoc a oțelului și a tensiunilor de întindere care se dezvoltă la temperaturi scăzute. Toate problemele pot fi observate la timp cu ajutorul unei inspecții periodice adecvate, folosind instrumente și echipamente specializate.

1.5.1.2. Categoriile de defecte și clasificarea lor

Defectele sunt împărțite în categorii, funcție de nivelul de defectare și urmărește luarea de măsuri corespunzătoare în exploatare și îmbunătățirea calității șinelor, în vederea prelungirii duratei lor în serviciu: în categoria I sunt cuprinse defectele care impun scoaterea șinelor din cale în cel mai scurt timp posibil, se impun restricții de viteză și măsuri de consolidare până la înlocuirea lor; categoria II conține șinele cu defecte care se pot dezvolta până la rupere, se impune ținerea sub observație a acestor defecte, se impune înlocuirea acestor șine până la șase luni după descoperirea lor, dacă aceste defecte progresează ele sunt trecute în categoria I și se vor trata conform cerințelor impuse de categorie; dacă defectele se pot remedia sau progresează lent, sunt cuprinse în categoria III, șinele

care conțin astfel de defecte pot fi înlăturate din cale conform planificării. De asemenea categoria defectului diferă și în funcție de poziția șinei în cale: linie directă, linie expedieri/primiri, linie curentă sau alte linii din stație, ("Instrucțiuni pentru determinarea defectelor șinelor și pentru verificarea șinelor în cale nr. 306," 1972).

Clasificarea defectelor se face cu scopul de determina în mod unitar cauza, felul și poziția lor în cale. Toate defectele se clasifică cu trei cifre după sistemul zecimal, prima cifră indică felul și poziția defectului în secțiunea șinei, se subîmpart în nouă subpuncte cu cifre cuprinse de la 1 la 9; a doua cifră indică cauzele principale care le-a produs, se subîmpart în zece subpuncte cu cifre de la 0 la 9; a treia cifră indică poziția defectului pe lungimea șinei, se subîmpart în opt subpuncte cu cifre de la 1 la 8. Prima și a doua cifră se împarte prin câte un punct. Detalierea celor expuse mai sus și a tipurilor de defecte cunoscute poate fi găsită în ("Instrucțiuni pentru determinarea defectelor șinelor și pentru verificarea șinelor în cale nr. 306," 1972).

1.5.1.3. Depistarea defectelor la calea ferată

Descoperirea defectelor în linie se poate face cu ajutorul mai multor metode, de exemplu: metode optice, pentru asta în țara noastră este folosit automotorul de diagnoză a căii și a liniei de contact în mod automat EM 130 R, figura 1.30, care este dotat cu sistemul ORIAN. Instrucțiuni privind defectoscopia optică este descrisă în ("Instrucție TMC,"), fiind conceput să măsoare profilul șinei, uzura șinelor pe suprafața de rulare a ciupercii și pe suprafața verticală a acestora, analiza șinelor ș.a.; metoda cu ultrasunete utilizat pentru depistarea discontinuităților din material. Pentru a examina în mod automat pe căile ferate din țară se folosește defectoscopul Dublu Sonatest Masterscan 380 pe Căruciorul RFD, figura 1.31. Instrucțiuni privind defectoscopia cu ultrasunete sunt descrise în instrucția ("Instrucțiuni pentru controlul ultrasonic al șinelor montate în cale, cu ajutorul cărucioarelor monorail tip SZ-52 și SZ-65,"). Ambele metode oferă o testare de control nedistructiv, fiind populare datorită mai multor avantaje: după verificare, nu rămân urme; este relativ ieftin, iar fiabilitatea datelor obținute este mare; se desfășoară în orice perioadă a anului, în orice condiții meteorologice; depistează chiar și cele mai mici defecte și avarii la șine.



figura 1.30 Automotor de diagnoză a căii și a liniei de contact EM 130 R, (C. I. Bărbîntă, 2014)



figura 1.31 Diagnosticarea zonei exfoliate folosind defectoscopul Dublu Sonatest Master-scan 380 pe Căruciorul RFD, (C. I. Bărbîntă, 2014)

1.5.1.4. Ruperea șinelor de cale ferată

Ruperea șinelor poate fi declanșată din mai multe cauze și care pot avea urmări grave asupra traficului feroviar, poate conduce la deraieri sau/și soldate cu decese, vătămări și pierderi financiare. De exemplu din cauza ruperii multiple și complete a șinei, figura 1.32, în data de 23.03.2019 pe raza de activitate a Sucursalei Regionale de Căi Ferate Brașov, linia 300, între Haltele de mișcare Bod și Feldioara, pe firul I de circulație, în aliniament, la km 188+190 în circulația trenului de marfă nr. 20285, a avut loc un accident feroviar prin deraierea vagonului seria Ha, nr.318127435812, figura 1.33, care s-a soldat cu pagube materiale în valoare de 578.150,59 lei (fără TVA), (AGIFER, 2020d).



figura 1.32 Șină de tip R65 ruptă, care a condus la deraierea vagonului, (AGIFER, 2020d)



figura 1.33 Deraierea vagonului de marfă nr. 318127435812, (AGIFER, 2020d)

Din raportul de investigare realizat în 2012, cu privire la determinarea cauzelor care au adus la ruperea șinelor de tip R65, predomină crăpături în ciuperca șinei pe suprafața de rulare cu formarea unei pete argintii sau negre în secțiunea inimii, fiind caracteristica comună pentru toate șinele rupte. De asemenea, au fost observate pe unele șine exfolieri de material, uzuri ondulatorii, fisuri înclinate în concavitate și alte tipuri de defecte. Din analiza metalografică realizată asupra unui cupon de șină

ruptă cu defecte, s-au constatat fisuri multiple și stratul deformat-plastic subiacent suprafeței de rulare, figura 1.36, figura 1.39, (AGIFER, 2012b; C. I. Bărbînță, 2014).

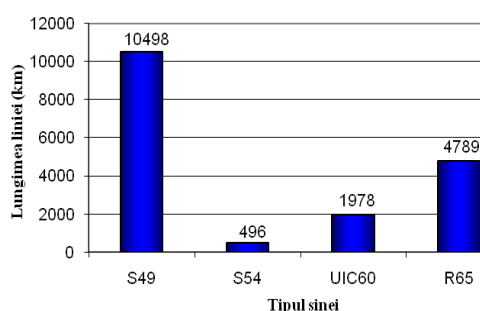


figura 1.34 Răspândirea șinelor pe rețeaua CFR, (Stafie, 2010)

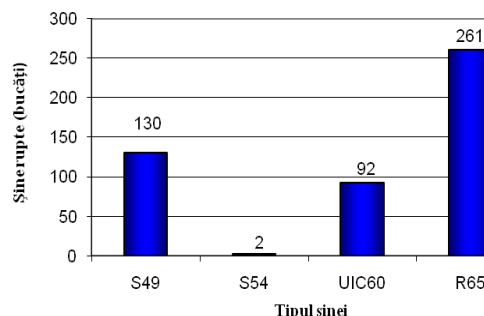


figura 1.35 Șine rupte în iarna 2009-2010, (Stafie, 2010)

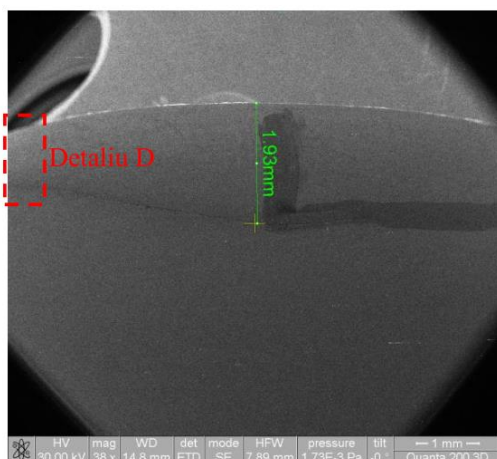


figura 1.36 Fisură situată la distanța de 1-2 mm subiacent suprafeței de rulare (38×), (AGIFER, 2012b; C. I. Bărbînță, 2014)

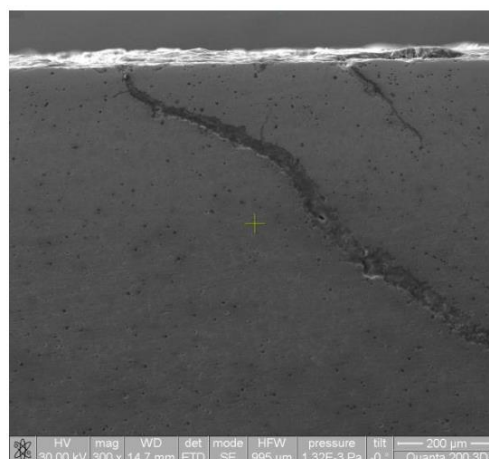


figura 1.37 Detaliu D a fisurii (300×), (C. I. Bărbînță, 2014) (AGIFER, 2012b).

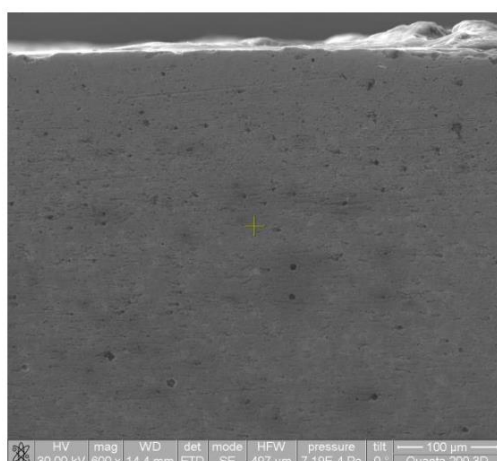


figura 1.38 Microstructura suprafeței de rulare (600×), (AGIFER, 2012b; C. I. Bărbînță, 2014)

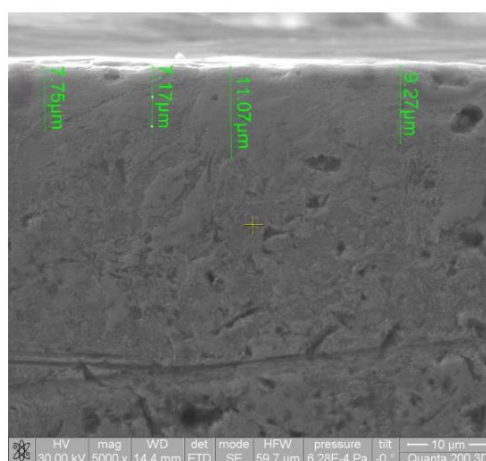


figura 1.39 Microstructura suprafeței de rulare (5000×), (C. I. Bărbînță, 2014) (AGIFER, 2012b)

1.5.1.5. Duritatea suprafețelor de rulare ale șinei

Din cauza interacțiunii roată/șină, oțelul se deformează și duritatea pe suprafața de rulare și subiacent acesteia se mărește considerabil. Rezultatele obținute pe suprafața de rulare și în secțiunea ciupercii se prezintă în figura 1.40÷figura 1.42.

În cadrul raportului de investigare s-au determinat duritățile HB (Brinell) în cale, pe șine tip R65 cu defecte reprezentând uzură ondulatorie, folosind microdurimetrul de model HLN-11A Hardness Tester, pentru punctele ridicate (convex) și cele coborâte (concave). Valorile obținute sunt prezentate în figura 1.40, punctele ridicate au valori cu mult superioare celor coborâte, diferența relativă medie între cele două durități (convexe și concave) fiind de 48,4 HB sau de aproximativ 11%, (AGIFER, 2012b; C. I. Bărbîntă, 2014).

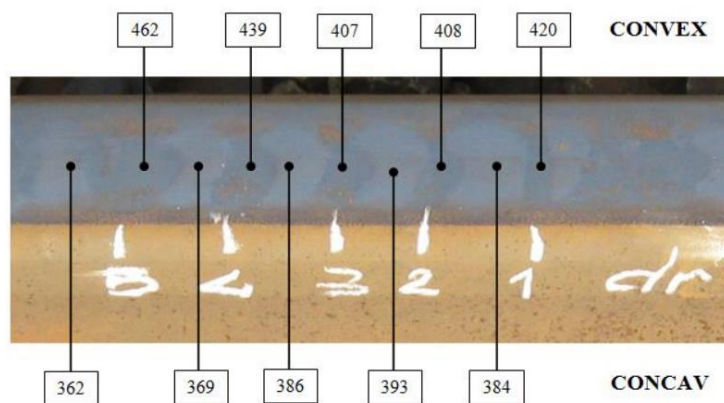


figura 1.40 Duritatea Brinell – rezultate obținute în situ, pe suprafața de rulare cu uzură ondulatorie pentru o șină tip R65, (AGIFER, 2012b; C. I. Bărbîntă, 2014)

Rezultatele obținute pentru duritățile Brinell (HB) cu ajutorul microdurimetrului EMCOTEST MIC – EmcoTest Austria, în secțiunea ciupercii subiacent suprafeței de rulare pentru o șină de tip R65 este prezentată în figura 1.41, (AGIFER, 2012b; C. I. Bărbîntă, 2014).

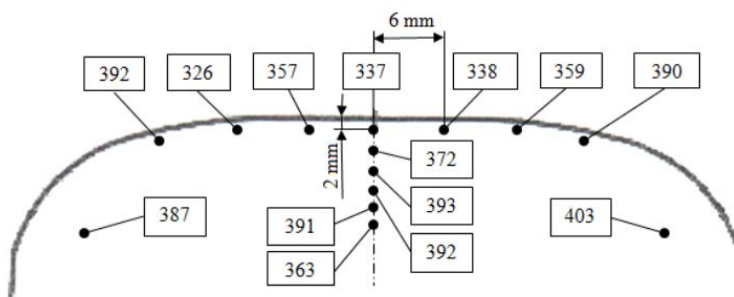


figura 1.41 Duritatea Vickers în secțiunea transversală a ciupercii, subiacent suprafeței de rulare pentru o șină tip R65, (AGIFER, 2012b; C. I. Bărbîntă, 2014)

Au fost studiate microstructura și distribuția de durități pe o șină scoasă din exploatare, în zona ciupercii șinei subiacent suprafeței de rulare funcție de sensul de mers al trenului, figura 1.42. Din analiza metalografică se poate observa un defect în microstructura oțelului, stratul alb dur, valo-

rile durității HV (Vickers) din acest strat fiind de 2-3 ori mai mari decât valorile durității din materialul de bază. Aceste defecte ale suprafeței de rulare pot conduce la exfolieri de material. De asemenea, se constată faptul că materialul suferă deformații mari în stratul subiacent suprafeței de rulate, direcția de deformare fiind o funcție de direcția de deplasare a trenului, (*Partie 1. Vers une approche tribologique de l'usure ondulatoire*).

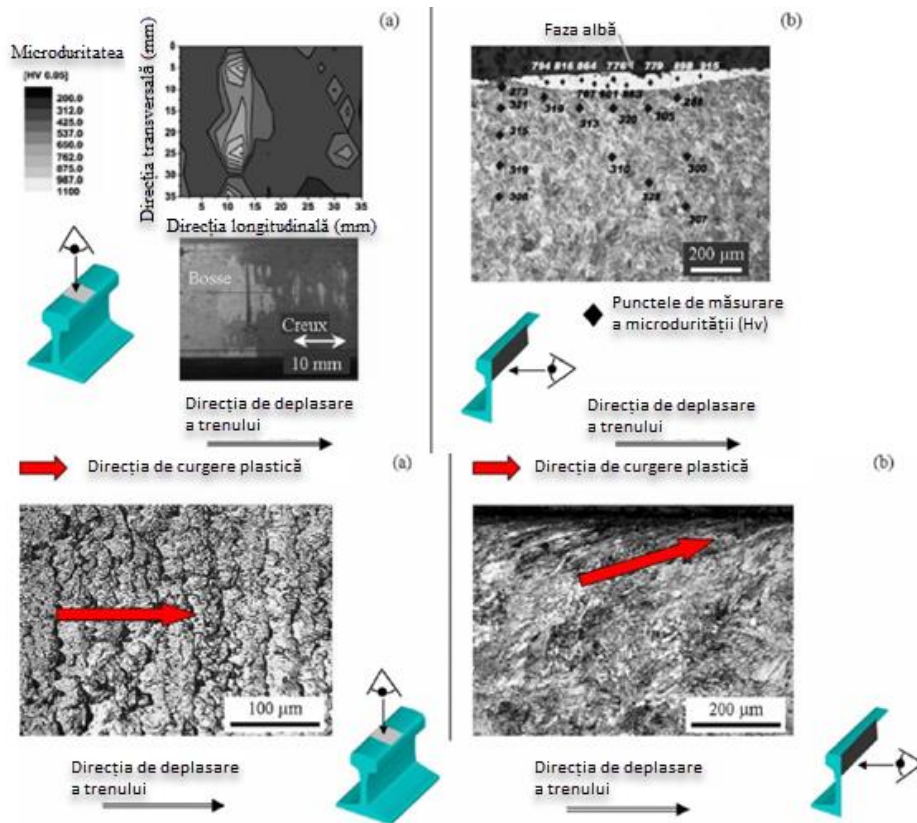


figura 1.42 Distribuția durității în șină și deformarea plastică a suprafeței șinei, (*Partie 1. Vers une approche tribologique de l'usure ondulatoire*)

1.5.2. Defectele roților

1.5.2.1. Defecte de fabricare

Transformările în microstructura oțelului roților de cale ferată, cauzate de nerespectarea regimului de accelerare/frânare și a vitezelor de circulație, au determinat conversia perlită/ferită în austenită/martensită. Aceste modificări au condus la propagarea fisurilor pe întreaga secțiune a roții și, în cele din urmă, la retragerea acesteia din exploatare, conform figura 1.43. În imagine se pot observa trei tipuri de defecte: locul aplatizat (flat), fisura (crack) și exfolierea (shelling) materialului de pe suprafața de rulare a roții, (Zucarelli, Vieira, Filhoc, Reisb, & Reisb, 2016).



figura 1.43 Defecte întâlnite la roțile de cale ferată, care au condus la scoaterea roții din exploatare, (Zucarelli et al., 2016)

Când se produce ruperea bandajului/roții de cale ferată, cauza poate fi nerespectarea tehnologiilor de fabricare, precum incluziunile nemetalice sau golurile din material. Prin cercetarea microstructurală și analiza EDX a unor probe extrase din bandajele rupte, s-au identificat incluziuni nemetalice în material, conform figura 1.44. Profilul incluziunii este caracterizat prin unghiuri ascuțite, ceea ce poate duce la apariția fisurilor în această zonă, datorită șocurilor și regimului alternant la care este supus oțelul roții în serviciu, ceea ce poate reduce semnificativ durabilitatea acesteia. În urma analizei EDX efectuate în zona unei incluziuni, s-a observat un conținut scăzut de Fe și C, datele fiind prezentate în tabelul tabelul 1.1, (C. I. Bărbîntă, 2014).

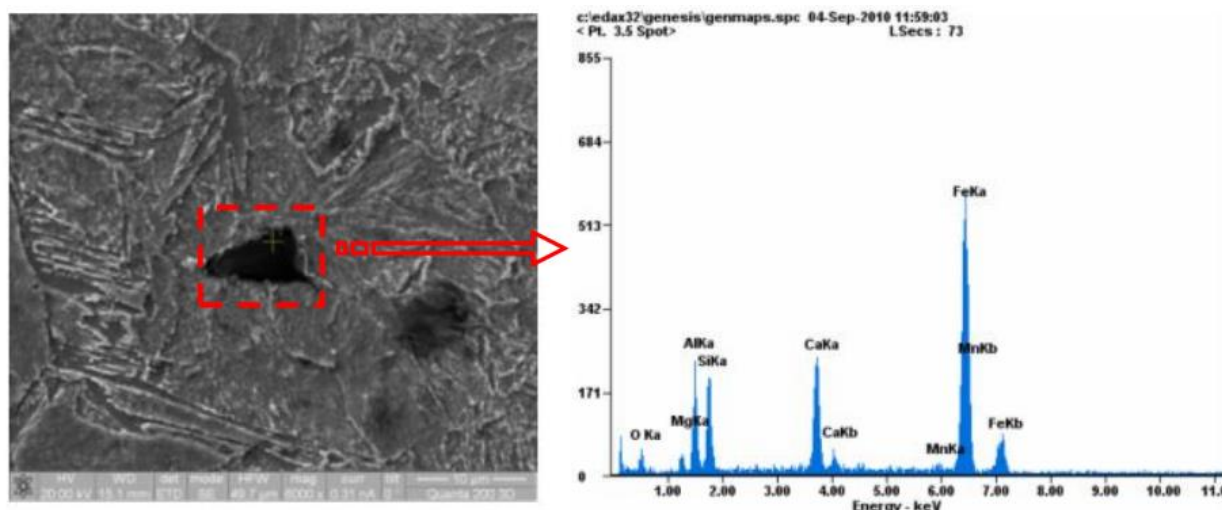


figura 1.44 Microstructura oțelului în zona incluziunii nemetalice, la o mărire de 3974× și analiza EDX a incluziunii

tabelul 1.1 Compoziția chimică a incluziunii din figura 1.44, (C. I. Bărbîntă, 2014)

Element	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn	Fe
Wt [%]	7.66	3.81	14.77	14.24	9.92	1.42	48.19
At [%]	16.95	5.54	19.37	17.94	8.76	0.91	30.54

Din analiza metalografică făcută asupra unor probe extrase din bandaje de locomotivă rupte, s-a constatat faptul că propagarea fisurii s-a realizat sub un unghi de 20° trecând prin incluziunile nemetalice și marginile grăunților. De asemenea, s-a constatat faptul că nucleul și propagarea fisurii analizate a fost în stratul subiacent suprafeței de rulare, în lungul materialului deformat plastic în urma solicitărilor termo-mecanice apărute în exploatare. Astfel de fisuri conduc într-un final la dezvoltarea defectelor de tip exfoliere/știrbituri pe suprafața de rulare a bandajului/roții, (Григорьев & Лепов, 2018).

1.5.2.2. Defecte cauzate de suprastructura căii

A avut loc o creștere a rigidității căii în ultimii ani, ca urmare a înlocuirii traverselor din lemn cu cele din beton, rigiditatea traversei din lemn fiind de două ori mai mică decât cea a traverselor din beton. În timpul iernii, rigiditatea traversei din beton scade încă de două ori. De exemplu: pentru trenurile care se deplasau pe căile dotate cu traverse din lemn, roțile/bandajele se defectau de 2 ori mai rar decât cele care circulau pe căile cu traverse din beton, (Бояркин, 2019). De asemenea, apariția defectelor la roți/bandaje sunt cauzate de parametrii de cale, care nu respectă instrucțiunile și normele în vigoare.

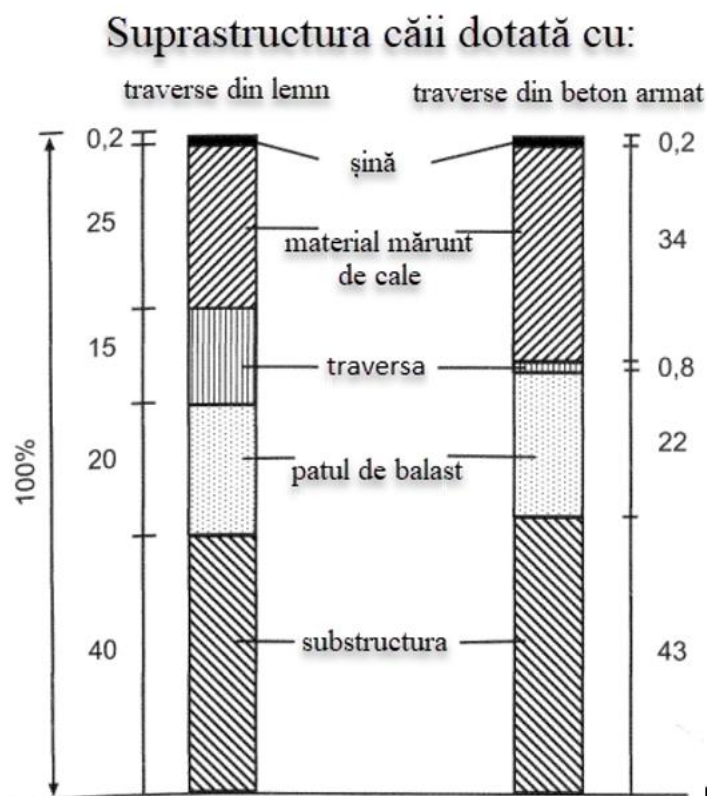


figura 1.45 Contribuția medie (%) a fiecărui element de cale portanță la întregul comportament elastic al căii, (Lichtberger, 2005)

1.5.2.3. Defecte cauzate de temperatură ridicată

O cauză care conduce la apariția defectelor pe suprafața de rulare a roții/bandajului este interacțiunea sabot/roată sau alunecarea roții pe șină. Din cauza frecării, în aceste cuple cresc temperaturile la peste 300 °C, (Ahlström & Karlsson, 1999). Temperaturile ridicate influențează negativ proprietățile mecanice ale oțelului. De exemplu: limita de curgere/rupere scade, astfel zona subiacentă suprafeței de rulare sub influența temperaturii, se deformează plastic mult mai intens, această zonă fiind nucleu pentru fisuri.

Temperatura ridicată a suprafeței de rulare modifică microstructura din perlită/ferită în austenită/martensită pe un volum considerabil de material subiacent suprafeței de rulare a roții/bandajului, iar zona afectată termic devine nucleu pentru fisuri care se pot propaga în interiorul roții, (Zucarelli et al., 2016). De asemenea, temperatura ridicată influențează negativ zona unde se micșorează grosimea obadei și, ca efect, cresc tensiunile radiale în disc, din partea interioară în zona de racordare la obadă, (Бояркин, 2019). S-a constatat faptul că cedarea roților/bandajelor sunt destul de des cauzate de fisurile termice și tensiunile de contact, care declanșează ruperea și este, de obicei, produsă de regimul de frânare nesatisfăcător, (Sakamoto, Toyama, & Hirakawa, 2000).

De asemenea, la roțile cu bandaj, variația de temperaturi ridicate în timp pot conduce la slăbirea forțelor de strângere având ca urmare rotirea bandajului pe obada roții și polizarea inelului de fixare, aceasta având ca urmare deraierea osiei montate de pe firele căii și producerea accidentului feroviar, (AFER, 2008a, 2008b, 2010; AGIFER, 2020a).

1.5.2.4. Ruperi de bandaj/roată de cale ferată

Incapacitatea de a depista la timpul potrivit fisura și propagarea ei în discul roții monobloc, la punctele de control a vagoanelor, conduce la ruperea completă a roții și retragerea vagonului din exploatare, figura 1.46. Propagarea fisurii în zona marginii obadei și ruperea completă a ei ca urmare a solicitărilor alternante din exploatare, este prezentată în figura 1.47, (Бояркин, 2019).



figura 1.46 Aspectul vizual al unei roți rupte, (Бояркин, 2019)

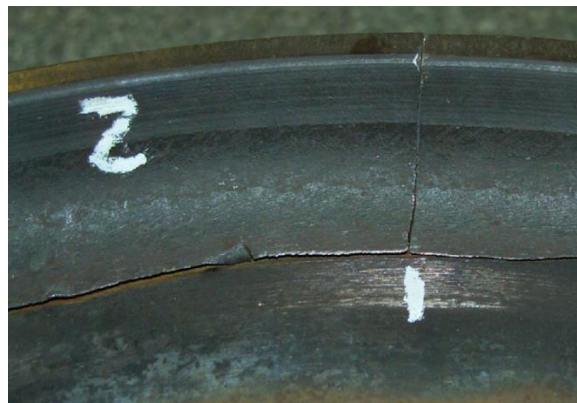


figura 1.47 Propagarea fisurii în marginea obadei, (Бояркин, 2019)

1.5.3. Defectele și uzura profilelor roților și a șinelor de cale ferată

Plecând de la considerentele teoretice și practice care decurg din studierea sistemului tribologic roată-șină, se pot pune bazele teoretice necesare posibilității de determinare a uzurilor ce apar în timp la roțile vehiculelor feroviare și la calea de rulare, cât și a înțelegerii și explicării diferitelor tipologii de defecte ce apar în exploatare.

În figura 1.48 sunt prezentate situațiile reale de contact întâlnite în exploatare în care șina și roata sunt neuzate sau recent rectificată (stânga sus) și situații când șinele sunt uzate. Se evidențiază modificările apărute la interfața roată – șină, datorită proceselor de uzură cauzate de solicitările din exploatare.

Defectele și uzura profilelor roților sau a șinelor poate fi cauza directă în producerea accidentului feroviar, prin pierderea capacității de ghidare a roților, (AFER, 2011b).



figura 1.48 Roată-șină neuzate (stânga sus) și roată-șină uzate (celelalte cazuri), (C. I. Bărbînță, 2014; Балановский, 2011)



figura 1.49 Uzura șinei de cale ferată la trecerea de patru ori a roții pe suprafața de rulare, contactul fiind contaminat cu nisip

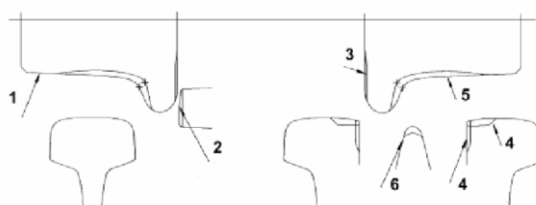


Figura 1.50 Localizarea uzurilor la roată și șină la trecerea peste aparatele de cale: 1 - Buză falsă (bavură de refulare); 2 - Uzură contrașină; 3 - Uzură roată (laterală); 4 - Uzură la aripă; 5 - Uzură roată (frontală); 6 - Uzură vârful,

Măsurarea profilelor și a uzurii la roți/șine se poate face utilizând profilometre. Prin intermediul profilometrului Miniprof au fost efectuate măsurători pentru trei cazuri: cazul I – pentru profilul șinei tip S49 și roții S1002, înclinarea șinei de 1/40, când roata și șina sunt neuzate și uzate, aceste măsurători fiind făcute în Germania, figura 1.51, (C.I. Bărbîntă, 2010); cazul II – pentru profilul roții S1002 și profilul șinei S49, pentru înclinarea șinei 1/20, când roata și șina sunt neuzate și uzate, (C.I. Bărbîntă, Lorenz, & Crețu, 2010); cazul III – cazul metroului din București, îndată după reprofilare, după un rulaj de 1000 km și după un rulaj de 2200 km după reprofilare, figura 1.51, (C. I. Bărbîntă, 2014).

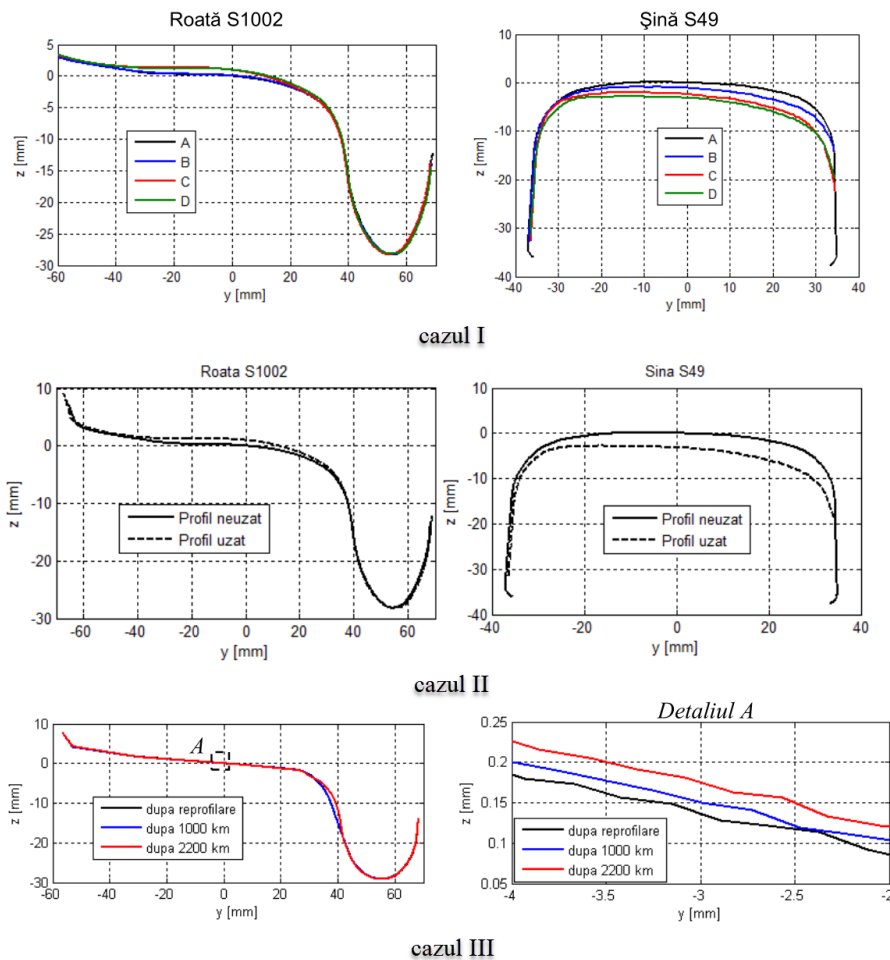


figura 1.51 Rezultatele măsurătorilor efectuate cu ajutorul profilometrului Miniprof, asupra profilelor șinelor și roților de cale ferată: cazul I - pentru profilul șinei tip S49 și roții S1002, înclinarea șinei de 1/40, când roata și șina sunt neuzate și uzate, A – profil neuzat și B,C,D – profile ce corespund unor stadii de uzură, (C.I. Bărbîntă, 2010); cazul II - pentru profilul roții S1002 și profilul șinei S49, pentru înclinarea șinei 1/20, când roata și șina sunt neuzate și uzate, (C.I. Bărbîntă et al., 2010); cazul III – cazul metroului din București, îndată după reprofilare, după un rulaj de 1000 km și 2200 km după reprofilare, (C. I. Bărbîntă, 2014)

Mecanica contactului cu frecare, figura 1.52, conține: suprafețe reale (conțin rugozități); neomogenități în material din cauza procesului de fabricare și a naturii materialelor reale; contaminări ale suprafețelor cu materiale terțe; modificări de temperatură cauzate de natura contactului cu frecare

și variații ale temperaturii din mediul ambiant. Din cauza frecării are loc modificarea parametrilor geometrici și, în final, distrugerea elementelor.

În urma interacțiunii dintre roată și șină, aceste elemente se uzează (tipuri fundamentale de uzură: adeziune, abraziune, oboseală și coroziune) și, ca urmare a acestui proces, are loc modificarea ecartamentului. Se modifică în cazul în care fața interioară a șinei se uzează la o distanță mai mare de 14 mm de la un plan paralel cu talpa șinei, planul intersectând suprafața de rulare a șinei uzate în axa acesteia.

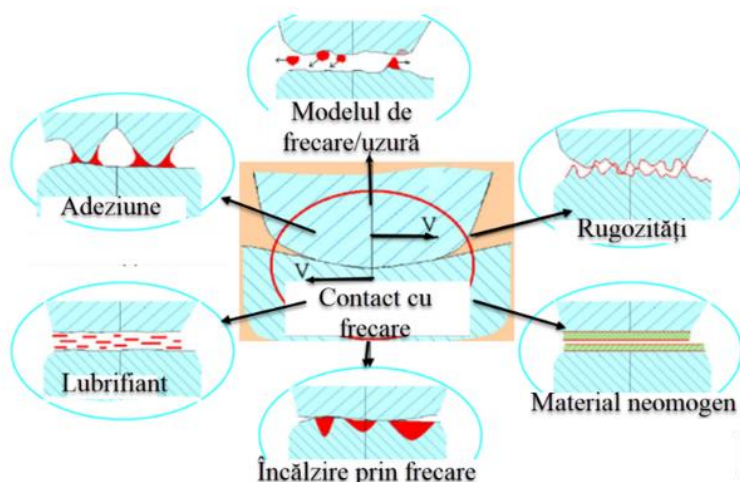


figura 1.52 Mecanica contactului cu frecare, (Балановский, 2011)

1.6. MENTENANȚA ȘI FIABILITATEA ROTII/ȘINEI DE CALE FERATĂ

1.6.1. Creșterea duratei de viață în serviciu pentru bandaje de locomotivă

Implementând în exploatare diverse tehnologii de mentenanță și fiabilitate se poate atinge o creștere substanțială a duratei de viață a șinelor/roților de cale ferată micșorând uzura la interfața roată/șină. În figura 1.53 se prezintă rezultatele obținute în urma implementării tehnologiilor și soluțiilor tehnice ce conduc la mărirea duratei de viață a bandajelor de locomotivă cu 3900%, (Захарова & Гершмана, 2009).

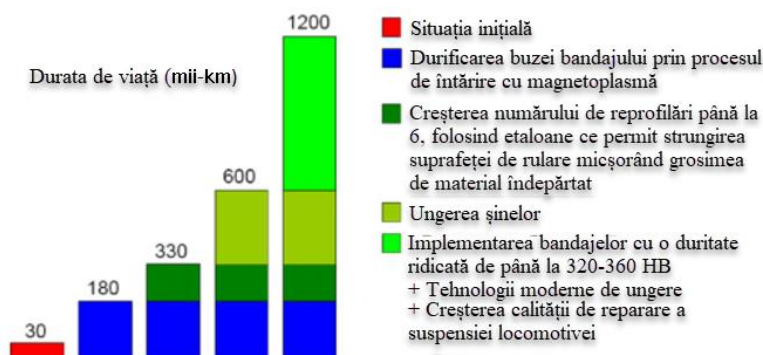


figura 1.53 Rezultatele implementării de tehnologii și soluții tehnice în vederea micșorării uzurii la interfața roată/șină pentru bandajele de locomotivă, (Захарова & Гершмана, 2009)

1.6.2. Recondiționarea prin sudură a elementelor căii

Cea mai utilizată metodă de reparare a șinelor este încărcarea cu sudură, (*Rail welding and reconditioning the permanent way*, 2004). Sudura se utilizează la: calea fără joante, figura 1.54, aplicarea sudurii realizând șine cu lungimi de mii de metri, egale cu distanța între stații; repararea zonelor deteriorate din șine, figura 1.55; recondiționarea prin sudură a suprafeței de rulare a șinelor/macazurilor.

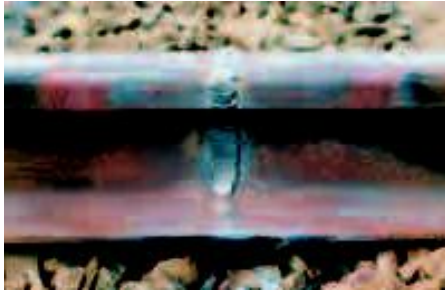


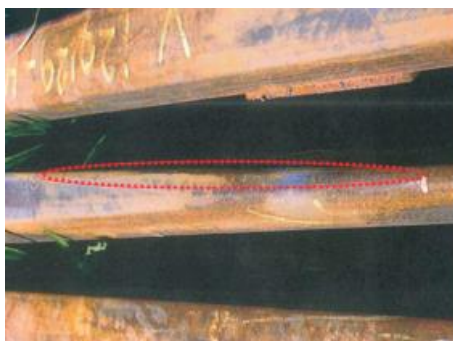
figura 1.54 Sudura capetelor de șine (*Rail welding and reconditioning the permanent way*, 2004)



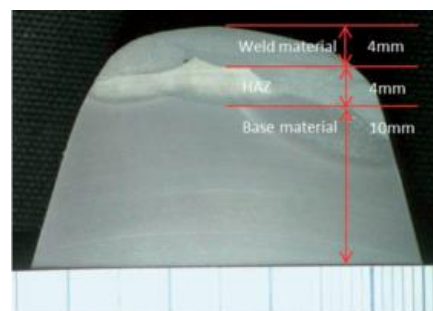
figura 1.55 Secțiunea transversală a șinelor reparate prin sudură (*Rail welding and reconditioning the permanent way*, 2004)

Recondiționarea prin sudură a macazurilor micșorează considerabil cheltuielile în comparație cu înlocuirea lui. Procesul de recondiționare conține următoarele etape: eliminarea defectului prin tăierea zonei care conține defectul; se acoperă zona tăiată prin încărcare cu sudură; se readuce la parametrii geometrici corespunzători impuși de standardele în vigoare prin procesul de polizare, (Xin, Markine, & Shevtsov, 2017).

În practică s-a observat că, în unele cazuri, procesul de sudură și polizare afectează în mod direct geometria elementelor din componența macazului și/sau proprietățile mecanice ale materialelor și pot avea efecte negative asupra deplasării materialului rulant și a duratei de viață a macazului, (Xin et al., 2017). În figura 1.56 (a), este prezentată o fisură în vârful inimii, fisura având nucleul în zona acoperită cu sudură.



(a)



(b)

figura 1.56 Macaz cu defect de sudură: (a) fisură în vârful inimii; (b) secțiunea transversală a zonei recondiționată prin sudură

Dacă zona care va fi recondiționată cu sudură nu este încălzită îndeajuns sau procesul de răcire a zonei încărcate decurge prea rapid, are loc procesul de transformare a microstructurii, se formează

martensita și materialul căpătă o duritate mai mare în comparație cu materialul de bază. În acest caz, materialul nu mai poate fi considerat omogen și va fi distribuit în mai multe straturi cu diferite durități, figura 1.56 (b), figura 1.57, (Xin et al., 2017).

În figura 1.57 se prezintă distribuția de durități realizată pe o probă extrasă din materialul macazului cu defect de sudură. Se prezintă cele trei straturi formate: stratul de sudură (weld material); stratul afectat termic cu „grăunți mari” (coarse HAZ) și cu “grăunți mici” (Fine HAZ); materialul de bază. Distribuția de durități în cele două straturi superioare este cu mult mai mare decât a materialului de bază.

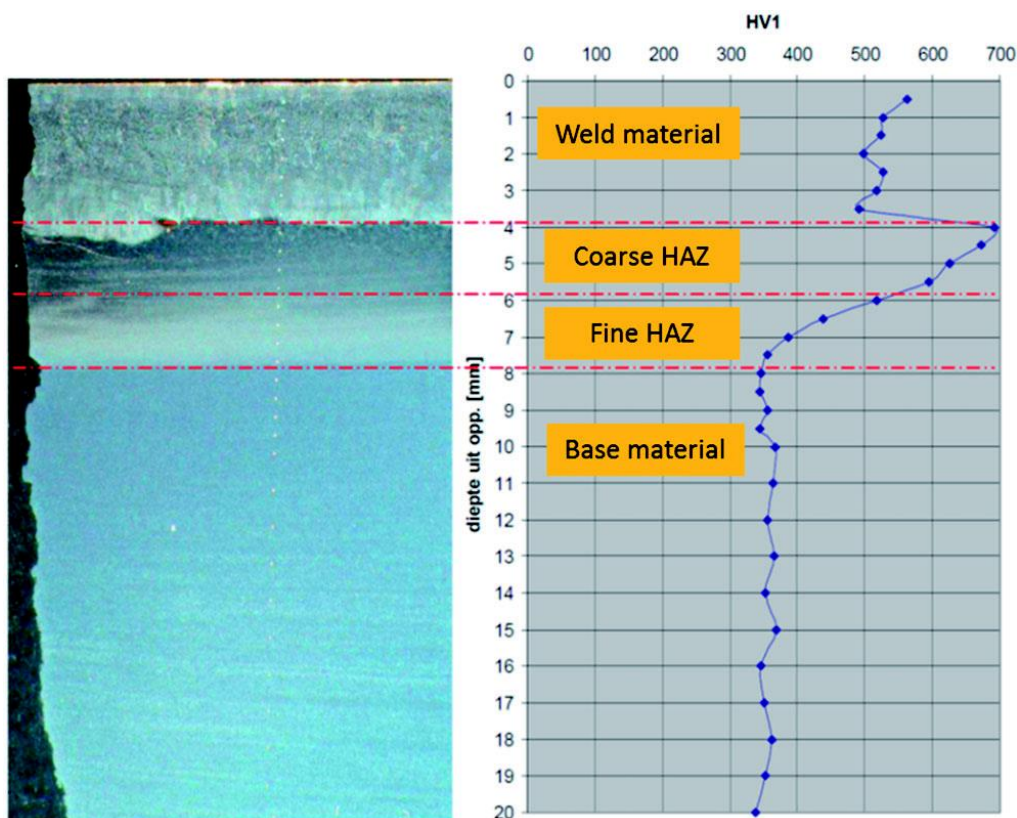


figura 1.57 Distribuția durității Vickers (HV) pe o probă extrasă din inima macazului cu defect de sudură, (Xin et al., 2017)

Duritatea maximă de aprox. 700 HV este măsurată în zona afectată termic cu grăunți mari (Coarse HAZ), fiind aproximativ de două ori mai mare decât a materialului de bază. De obicei, nucleul fisurilor se află între stratul reconșionat prin sudură și materialul de bază. În această zonă materialul a avut o transformare de microstructură și conține un număr mare de micro-fisuri ceea ce mărește fragilitatea. Microfisurile se propagă în macrofisuri în urma încărcării ciclice alternante și, luând în considerare faptul că materialul nu este omogen, fiind distribuit pe straturi, se produc concentratori de tensiune între straturi cu inițierea de noi fisuri, (Xin et al., 2017).

1.6.3. Polizarea șinelor de cale ferată

Procesul de polizare elimină micile defecte de pe suprafața de rulare și suprafețele laterale ale șinei și încetinește dezvoltarea uzurii și propagarea fisurilor. Ținând sub control uzura, prin intermediul „ratei magice de uzură”, figura 1.58, se poate atinge creșterea maximă a duratei de viață a șinei, utilizând metoda: S1 – preventivă inițial; S2 – preventivă sistematic; S3 – mentenanță; S4 – corectivă; S5 – fără polizare.

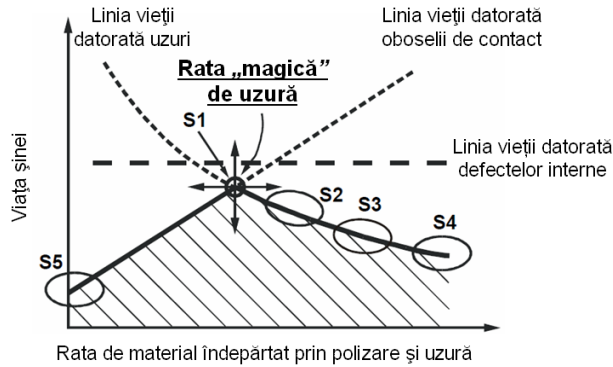


figura 1.58 Creșterea duratei de viață a șinelor prin intermediul „ratei magice de uzură”, (C. I. Bărbînță, 2014)

Studiul realizat cu privire la propagarea fisurii în adâncimea ciupercii funcție de traficul acumulat, pentru cazul când se efectuează polizarea preventivă a șinei și pentru cazul când nu se efectuează polizarea preventivă, este prezentat în figura 1.59. Se observă faptul că, dacă nu se efectuează polizarea preventivă a șinei, fisura care are nucleul în zona subiacentă suprafeței de rulare se propagă pe distanțe mult mai lungi, iar, în cazul în care este efectuată polizarea preventivă, propagarea fisurii în adâncime este stopată.

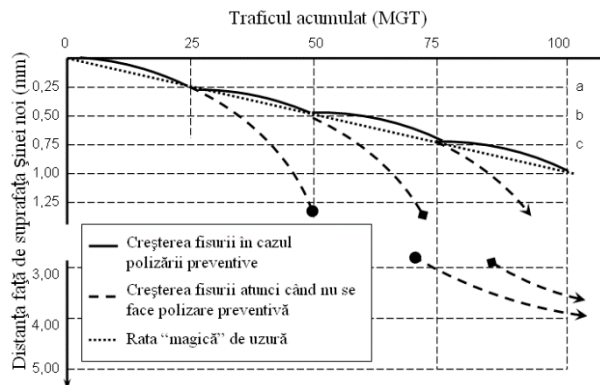


figura 1.59 „Rata magică de uzură”, (C. I. Bărbînță, 2014)

1.6.4. Restaurarea roților de cale ferată prin încărcarea cu sudură cu arc acoperit

În figura 1.60 se prezintă: (a) - procesul de restaurare a roții prin încărcare cu sudură cu arc acoperit, care oferă o microstructură cu constituenți structurali de tip ferită-perlită; (b) - mașina de sudare; (c) încărcarea cu sudură a buzei roții; (d) - restaurarea completă a jantei și zona afectată termic (HAZ).

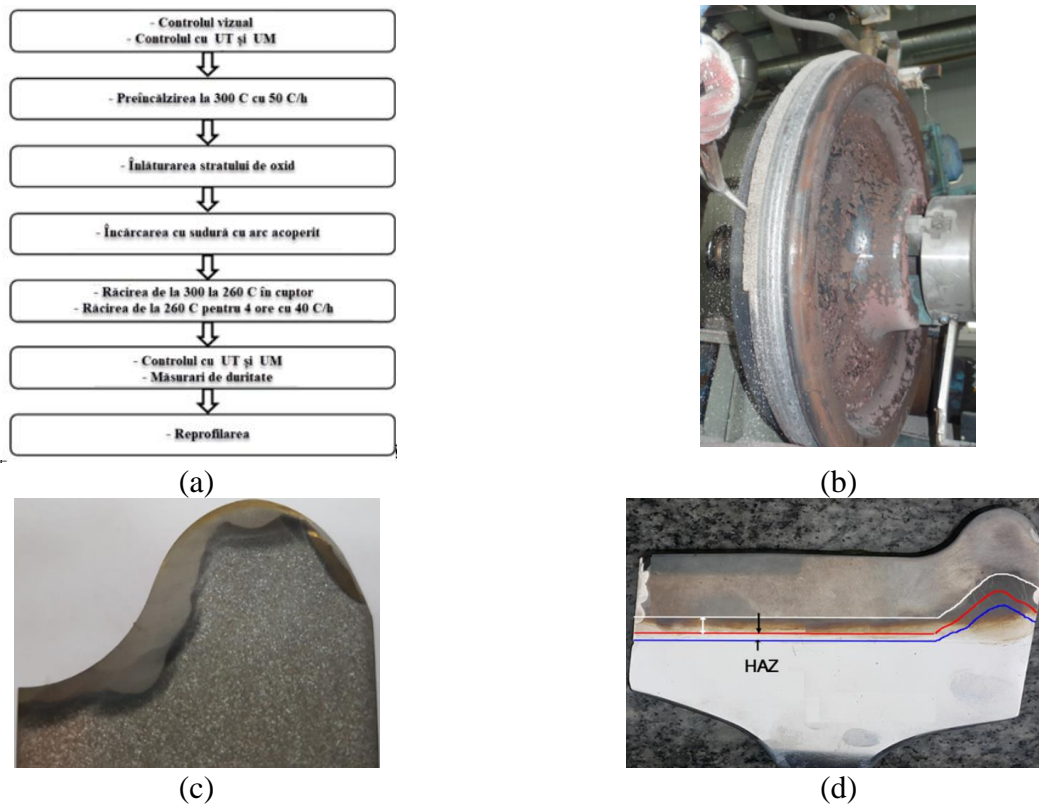


figura 1.60 (a) Procesul de restaurare a roții prin încărcare cu sudură cu arc acoperit a jantei roții; (b) mașina automată de încărcare cu sudură, (c) buza roții încărcată cu sudură, (d) buza și janta roții încărcată cu sudură, zona influențată termic (ZIT(HAZ)), (Coo & Lee, 2020)

Procesul de restaurare a roții, figura 1.60 (a), cuprinde următoarele operații: controlul vizual al suprafeței ce va fi încărcată cu sudură (V); controlul cu ultrasunete (UT) și pulberi magnetice (UM); preîncălzirea roții la temperatura de 300 °C cu viteza de încălzire de 50 °C/h și menținută la această temperatură timp de o oră; înlăturarea zonei oxidate; încărcarea cu sudură la o temperatură minimă de sudare de 160 °C; se transferă roata de pe instalația de sudură în cuptor și se menține la temperatura de 300 °C, unde se răcește până la temperatura de 260 °C; răcirea de la 260 °C până la 100 °C cu viteza de răcire de 40 °C/h și apoi se extrage din cuptor; urmează controlul cu ultrasunete (UT) și pulberi magnetice (UM); teste de duritate și reprofilarea suprafeței de rulare, (Coo & Lee, 2020).

Asupra probelor prelevate din janta restaurată s-au efectuat analize de microstructură. În figura 1.61 se prezintă microstructura obținută cu ajutorul analizei SEM: (a) pentru materialul de bază, (b) pentru zona afectată termic, unde cu negru este reprezentat constituentul structural de tip ferită, (c) și (d) pentru zona încărcată cu sudură pentru o mărire de x1000 și x3000, care este compusă din constituentul structural de tip bainită.

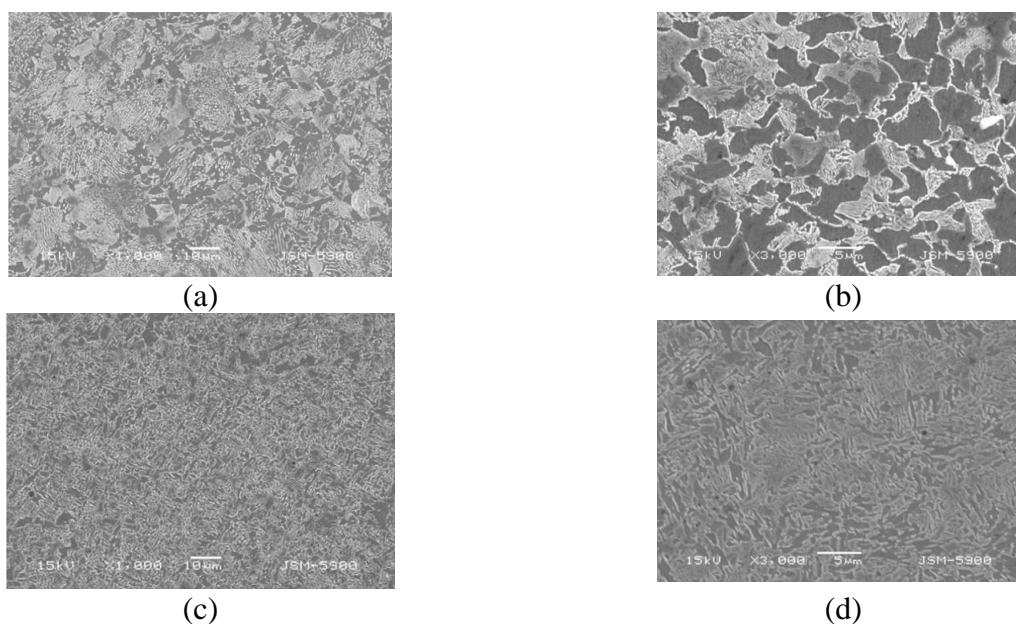


figura 1.61 Analiza SEM a materialului de bază (a), a zonei afectate termic (HAZ) (b), a zonei de topire pentru o mărire de $1000\times$ (c), a zonei de topire pentru o mărire de $3000\times$ (d), (Coo & Lee, 2020)

1.7. DIRECȚII DE CERCETARE

Din studiul de sinteză efectuat în acest prim capitol, s-au desprins următoarele direcții de cercetare:

- i. cercetări privind metalografia și proprietățile mecanice ale roților și șinelor de cale ferată ce au fost în exploatare;
- ii. cercetări privind studiul experimental al contactului roată – șină prin metoda fotoelastică;
- iii. cercetări privind studiul uzurii, determinarea parametrilor de aderență și determinarea intensității de uzare la contactul roată – șină;
- iv. studii teoretice privind contactul concentrat ne-Hertzian și dezvoltarea mai multor modele prin metoda elementelor finite, care să permită determinarea rapidă a distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- v. influența frecării asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- vi. influența temperaturii asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- vii. influența proprietăților de material asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- viii. influența parametrilor geometrici ai căii asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- ix. influența defectelor și a uzurii asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- x. influența neomogenității materialului asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- xi. influența parametrilor liniei de cale ferată asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- xii. modelarea 3D a boghiului asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină la mișcarea în aliniament și în curbă.

CAPITOLUL 2: APARATURA EXPERIMENTALĂ

Capitolul descrie echipamentele și a aparatura experimentală utilizată la atingerea obiectivelor de cercetare stabilite, printre acestea se numără: microscopul optic de cercetare inversat pentru testarea materialelor LEICA DMI5000 M; microscopul electronic cu scanare QUANTA 200 3D DUAL BEAM; Difractometrul cu raze X PANALYTICAL X'PERT PRO MRD; spectrometru cu emisie optică ARL 3460; microdurimetru model EMCOTEST M1C - EMCOTEST AUSTRIA; defectoscop US EPOCH LT; mașina universală de încercări statice și la oboseală INSTRON 8801; tribometrul CETR UMT-2; Tribometrul AMSLER; Puntea tensometrică VISHAY P3; PHOTOSTRESS PLUS; mașina de încercări la încovoierea prin șoc cu ciocan pendul CHARPY MC; rugozimetrul form TALYSURF INTRA 50 (TAYLOR HOBSON, ANGLIA); balanța analitică ADAM EQUIPMENT PW-254; Spectrometru FOUNDRY-MASTER.

CAPITOLUL 3: CERCETĂRI EXPERIMENTALE

3.1. CONȚINUTUL CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE

Prezentul studiu are ca scop evidențierea eventualelor degradări survenite în exploatarea șinelor și bandajelor de cale ferată, denumite, în continuare, '85, '86, UIC60, NOUĂ și bandaj. Șinele '85 și '86 au fost în exploatare încă din anii 1985 și 1986, dorindu-se să se stabilească posibila rezervă de bună funcționare, pe un alt traseu de lucru, al acestora.

Următoarele denumiri vor fi utilizate în continuare: „șina '85”, „șina '86”, „șina UIC60”, „șina NOUĂ” și „bandaj”, aparțin tipurilor de șină și bandaj din care s-au realizat prelevările de probe, precum și modul și locul de unde fost prelevate, în conformitate cu standardul ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017) și fișa ("UIC 810-1 Technical specification for the supply of rough rolled non-alloy steel tyres for tractive and trailing stock," 2003).

3.2. REZISTENȚA LA TRACȚIUNE ȘI ALUNGIREA LA RUPERE

3.2.1. Diagrame caracteristice și mărimile obținute la încercarea de tracțiune statică

Se face mențiunea că, în cadrul diagramelor se vor vedea scrise mențiunile: „proba negru” ceea ce înseamnă probă prelevată din șina '86; „proba alb” ceea ce înseamnă probă prelevată din șina '85; proba NOUĂ, proba șină UIC60 și proba bandaj.

Rezultatele obținute se prezintă în cele ce urmează, sub formă de diagrame și tabele.

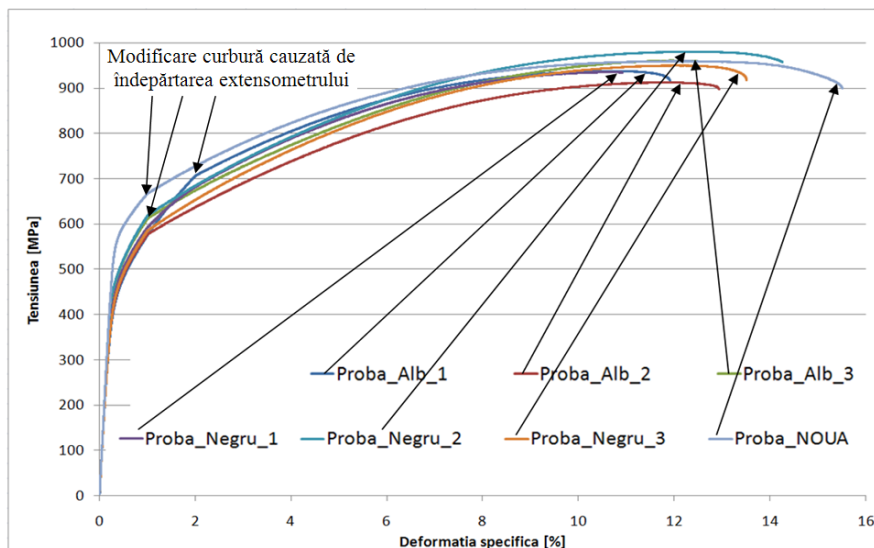


figura 3.1 Diagramele caracteristice obținute pentru încercarea de tracțiune pentru șina "șina '85", șina "șina '86" și șina "NOUĂ"

3.2.2. Rezultate obținute privind determinarea modului de elasticitate și a coeficientului Poisson

Pe baza rezultatelor prezentate în teză s-au trasat următoarele grafice:

- Variația tensiunii în raport cu deformația specifică longitudinală pentru șina '85, figura 3.2 (a);
- Variația deformației specifice longitudinale în raport cu deformația specifică transversală, pentru șina '85, figura 3.2 (b);
- Variația tensiunii în raport cu deformația specifică longitudinală pentru șina '86, figura 3.3 (a);
- Variația deformației specifice longitudinale în raport cu deformația specifică transversală, pentru șina '86, figura 3.3 (b);
- Variația tensiunii în raport cu deformația specifică longitudinală pentru bandaj, figura 3.4 (a);
- Variația deformației specifice longitudinale în raport cu deformația specifică transversală, pentru bandaj, figura 3.4 (b);

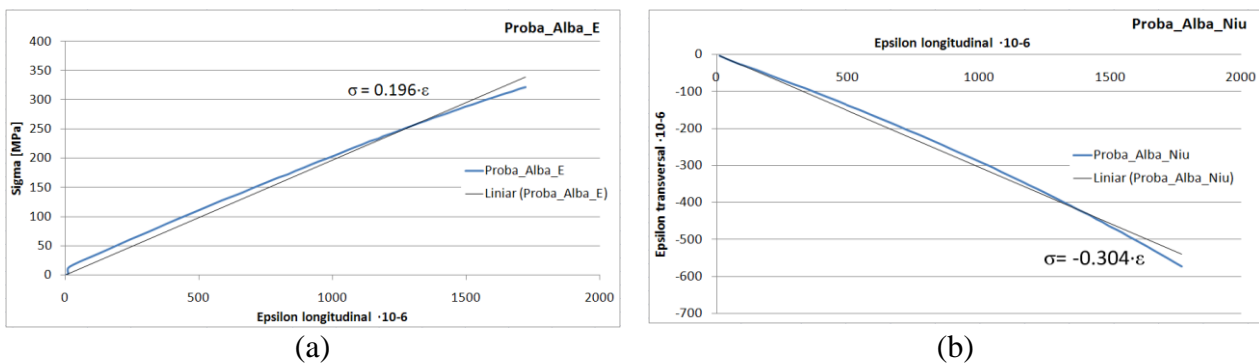


figura 3.2 Determinarea modului de elasticitate longitudinală și a coeficientului Poisson pentru proba albă (șina '85): $E = 1,96 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$; $\nu = 0,304$

În figura 3.2, se poate observa curba care prezintă variația tensiunii în funcție de deformația specifică longitudinală pentru șina '85. Această curbă poate fi aproximată printr-o dreaptă, iar panta acestei drepte reprezintă modulul de elasticitate longitudinală. Este important să menționăm că valoarea de 0,196 prezentă în grafic trebuie multiplicată cu 10^6 , deoarece valorile pentru deformația specifică sunt exprimate în $\mu\epsilon$ (adica 10^{-6}), ceea ce înseamnă $\mu\text{m/m}$, iar valoarea finală trebuie să fie adimensională.

figura 3.2 (b) prezintă curba variației deformației specifice longitudinale în raport cu deformația specifică transversală pentru șina '85. Această curbă poate fi aproximată printr-o dreaptă, iar panta acestei drepte corespunde coeficientului Poisson, care este de 0,304.

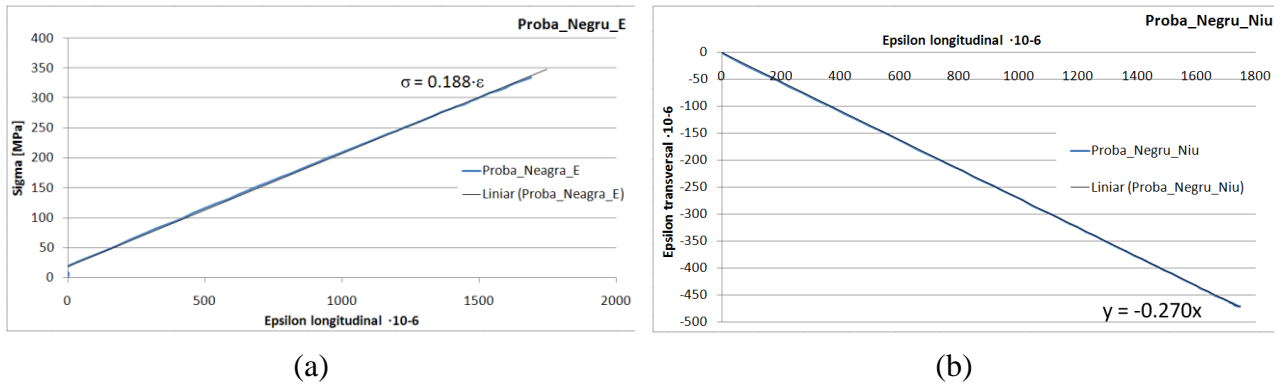


figura 3.3 Determinarea modului de elasticitate longitudinală și a coeficientului Poisson pentru proba neagră (șina '86): $E = 1,88 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$; $\nu = 0,27$

În figura 3.3 (a), curba de variație a tensiunii în raport cu deformația specifică longitudinală, pentru șina '86, se aproximează cu o dreaptă, panta acestei drepte reprezentând tocmai modulul de elasticitate longitudinală: $1,88 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$.

În figura 3.3 (b), curba de variație a deformației specifice longitudinale în raport cu deformația specifică transversală, pentru șina '86, se aproximează cu o dreaptă, panta acestei drepte reprezentând tocmai coeficientul Poisson: 0,27.

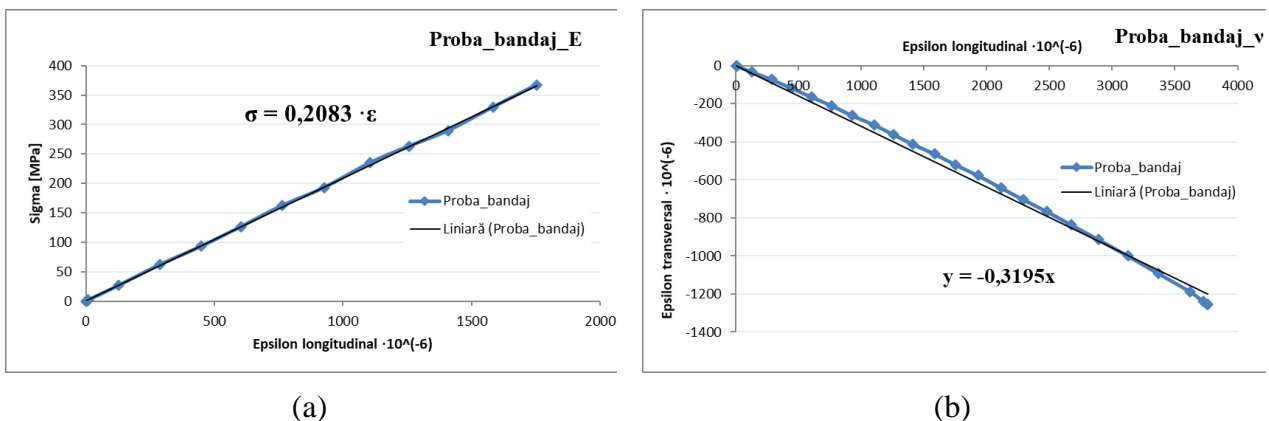


figura 3.4 Determinarea modului de elasticitate longitudinală și a coeficientului Poisson pentru proba bandaj: $E = 2,083 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$; $\nu = 0,319$

În figura 3.4 (a), putem observa curba care arată variația tensiunii în funcție de deformația specifică longitudinală pentru bandaj. Această curbă este aproximată printr-o dreaptă, iar panta acestei drepte reprezintă modulul de elasticitate longitudinală, care este de $2,083 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$.

În figura 3.4 (b), putem observa curba care arată variația deformației specifice longitudinale în raport cu deformația specifică transversală pentru bandaj. Această curbă este aproximată printr-o dreaptă, iar panta acestei drepte corespunde coeficientului Poisson, care este de 0,319.

3.2.3. Concluzii

Astfel, din tabelele furnizate de mașina de încercat, se pot vedea, pentru fiecare probă în parte, o serie de caracteristici cum ar fi: rezistența la tracțiune, alungirea la rupere, limita de curgere, energia utilizată până la tensiunea maximă, energia utilizată până la rupere, modulul de elasticitate

longitudinală, ș.a. Pentru șina '85, șina '86, NOUĂ, UIC60 și bandaj am avut la dispoziție probe care au fost solicitate până la rupere.

Se constată următoarele:

- Valorile medii ale rezistențelor la tracțiune, respectiv σ_{UTS} , sunt apropiate, respectiv: 936 MPa pentru șina '85, 956 MPa pentru șina '86, 959 MPa pentru șina NOUĂ, 1081 MPa pentru șina UIC60 și 959,18 MPa pentru bandaj;
- Apar anumite diferențe în ceea ce privește alungirea la rupere: 12,1% pentru șina '85, 13,5% pentru șina '86 și 15,5% pentru șina NOUĂ și gătuirea la rupere: 5% pentru șina '85, 6,6% pentru șina '86 și 11,8% pentru șina NOUĂ.
- În aceste condiții se remarcă diferențe și în ceea ce privește energia acumulată până la rupere (elastică + plastică, procentul cel mai mare fiind dat de energia de deformare plastică): 379 J pentru șina '85, 426 J pentru șina '86 și 521 J pentru șina NOUĂ;
- Se remarcă diferențe și în ceea ce privește energia acumulată până la rupere (elastică și plastică, procentul cel mai mare fiind dat de energia de deformare plastică) pentru probele mici fiind: 68,86 J pentru bandaj, 64 J pentru șina UIC60;

Având în vedere aceste rezultate, se poate concluziona că șinele '85 și '86 nu au aceeași capacitate de preluare a sarcinilor exterioare și de înmagazinare a energiei de deformare ca șina NOUĂ, de asemenea materialul din bandaj are o capacitate mai mare de preluare a sarcinilor exterioare și de înmagazinare a energiei de deformare ca materialul folosit la construcția șinelor UIC60. Valorile ușor diferite pentru caracteristicile menționate ale acestor șine față de cea NOUĂ și a șinei UIC60, reieșite din cadrul acestei încercări, pot fi o consecință, fie elaborării tehnologice a materialului fie a deteriorării în timp a respectivelor caracteristici. Valorile diferite pentru caracteristicile șinelor față de materialul bandajului, reieșite din cadrul acestei încercări, este o consecință elaborării tehnologice diferite. Pe baza următoarelor încercări, respectiv: solicitarea la oboseală, încercări de Mecanica ruperii și analize chimice și structurale, vom determina, în ce măsură a avut loc o deteriorare în exploatare a acestor caracteristici.

Din punct de vedere a rezistenței la rupere prin tracțiune, valorile pentru materialele din care sunt confecționate șinele '85, '86 și UIC60 sunt foarte apropiate de cele determinate pentru materialul șinei NOI.

3.3. ÎNCERCĂRI PENTRU DETERMINAREA TENACITĂȚII LA FISURARE SAU A REZISTENȚEI LA FISURARE

3.3.1. Rezultate experimentale obținute

Se precizează faptul că, după ruperea probei, softul cere următoarele date, măsurate pe proba ruptă în totalitate: valoarea lungimii creștăturii, valorile lungimii fisurii, la marginile probei (0% și 100%), la 25%, 50% și 75% din lățime, conform figura 3.5. În aceste condiții, măsurătorile sunt precise și pe baza acestora, softul „KIC” va efectua calculele privitoare la tenacitatea la fisurare.

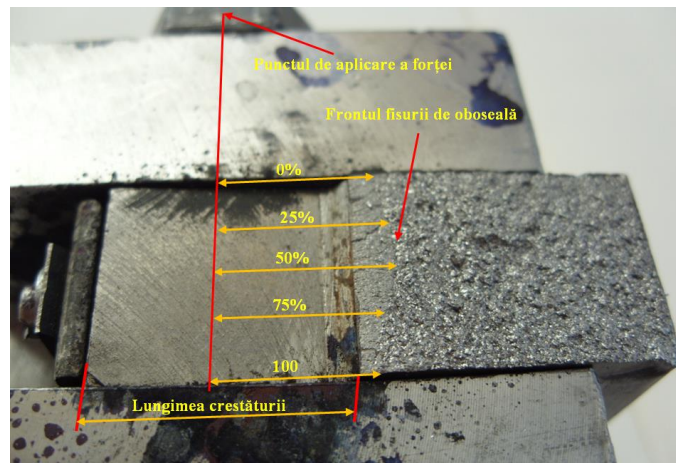


figura 3.5 Măsurarea mărimilor necesare pentru calculul K_{Ic}

Observații: probele prelevate din șinele de cale ferată au fost decupate sub mărimea cerută de standard ($B_1 = 20$ mm $B_2 = 14,9$ mm în raport cu 25 mm – standard) din cauza mărimii ciupericii și a bandajului, în consecință, aplicarea relației (3.1) nu conduce la validitatea încercărilor. Totuși, materialul având o comportare preponderent fragilă, suprafața fisurată a pieselor a rezultat plană, fără deformații plastice. În aceste condiții, se poate spune faptul că, sunt respectate condițiile stării plane de deformare. Așadar, valoarea K_q indicată de softul „K_{Ic}” poate fi asimilată pentru tenacitatea la fisurare K_{Ic} . Astfel vom avea:

$$K_{Ic,șină'85} = 47,01 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

$$K_{Ic,șină'86} = 51,43 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

$$K_{Ic,șină nouă} = 59,96 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

$$K_{Ic,șină UIC60} = 77,65 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

$$K_{Ic,bandaj} = 88,23 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

3.3.2. Concluzii

Se constată faptul că, valorile tenacității la fisurare pentru materialul șinelor '85, '86 și UIC60 sunt apropiate de cele ale materialului șinei NOI. Pe de altă parte, aceste valori sunt mai mari decât cele indicate de standardul SR EN 13674-1:2011 ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017) atât ca valori individuale cât și ca valori medii.

3.4. DETERMINAREA VITEZEI DE PROPAGARE A FISURII PRIN OBOSEALĂ

3.4.1. Rezultate experimentale obținute

3.4.1.1. Calculul da/dN pentru șina '85

Modul de determinare a vitezei de propagare a fisurii se prezintă în cele ce urmează.

Din tabelul de date furnizat de către mașina de încercat se preiau datele necesare și se trasează variația da/dN în raport cu timpul (sau cu numărul de cicluri), figura 3.6. Așa cum se constată din

figura 3.6, viteza de propagare a fisurii variază în timpul încercării. De exemplu, în perioada de sfârșit a încercării viteza de propagare a fisurii crește în mod semnificativ. Totuși, pe noi ne interesează zona în care viteza de propagare a fisurii are o valoare constantă, atunci când suntem cu lungimea fisurii la o valoare intermediară: nici la început cât apar fenomene legate de ecruisare, nici la sfârșit când deja lungimea fisurii a ajuns la o valoare la care aceasta se propagă cu viteză destul de mare, chiar brusc. Se poate aproxima variația da/dN în raport cu timpul, cu un polinom de gradul 4. În consecință pentru calculul vitezei de propagare a fisurii în acest caz, am ales timpul de 200 secunde ca fiind semnificativ pentru constanța vitezei de propagare a fisurii. În graficul din figura 3.6 s-a găsit pentru viteza de propagare a fisurii pentru proba '85, la timpul de 200 secunde:

$$da/dN_{șina'85} = 0,0000985 \text{ mm/ciclu} \quad (3.2)$$

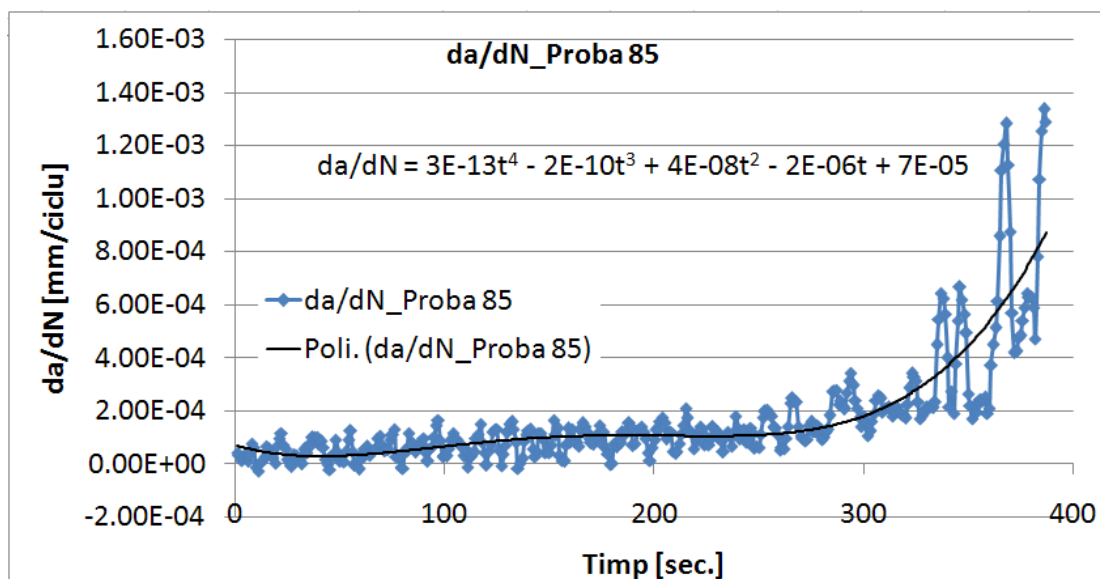


figura 3.6 Variația în timp a vitezei de propagare a fisurii – proba '85

3.4.1.2. Calculul da/dN pentru șina '86

S-a aproximat cu o curbă polinomială de gradul 4 pentru a aproxima variația da/dN în funcție de timp. Se observă că viteza de propagare a fisurii începe să crească după aproximativ 150 de secunde de la începutul încercării. Prin urmare, se poate considera că valoarea timpului de 136 de secunde este reprezentativă pentru determinarea vitezei de propagare a fisurii. La această valoare, se înregistrează începutul creșterii vitezei de propagare a fisurii. În figura 3.7 se poate observa că pentru proba '86, la timpul de 136 secunde, viteza de propagare a fisurii a fost determinată.

$$da/dN_{șina'86} = 0,0000935 \text{ mm/ciclu} \quad (3.2)$$

În figura 3.7 se prezintă variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu timpul pentru șina '86.

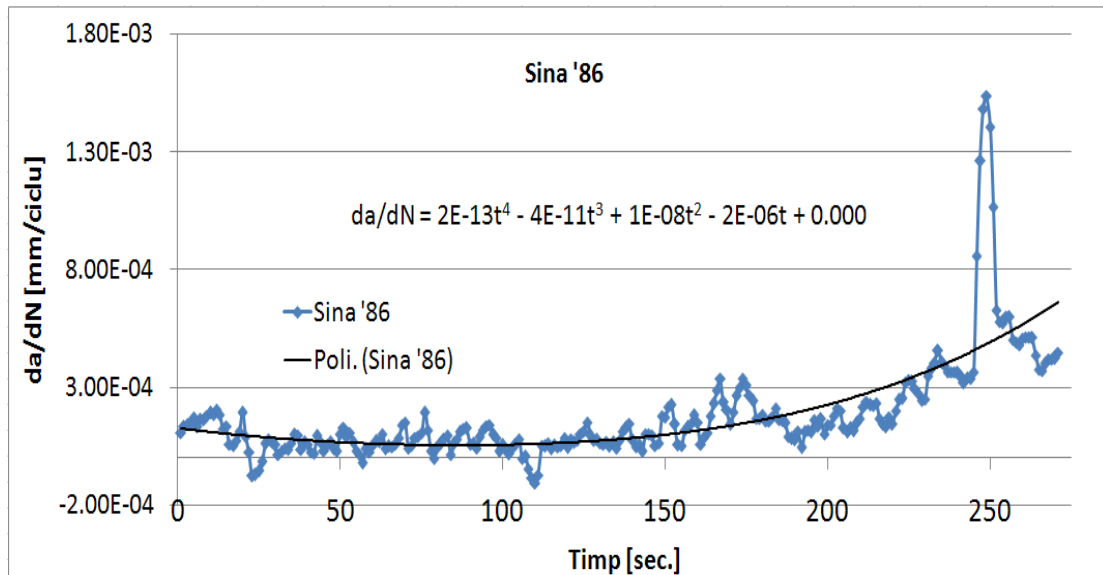


figura 3.7 Variația în timp a vitezei de propagare a fisurii – proba '86

3.4.1.3. Calculul da/dN pentru șina nouă

În figura 3.8 se prezintă variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu timpul pentru șina nouă.

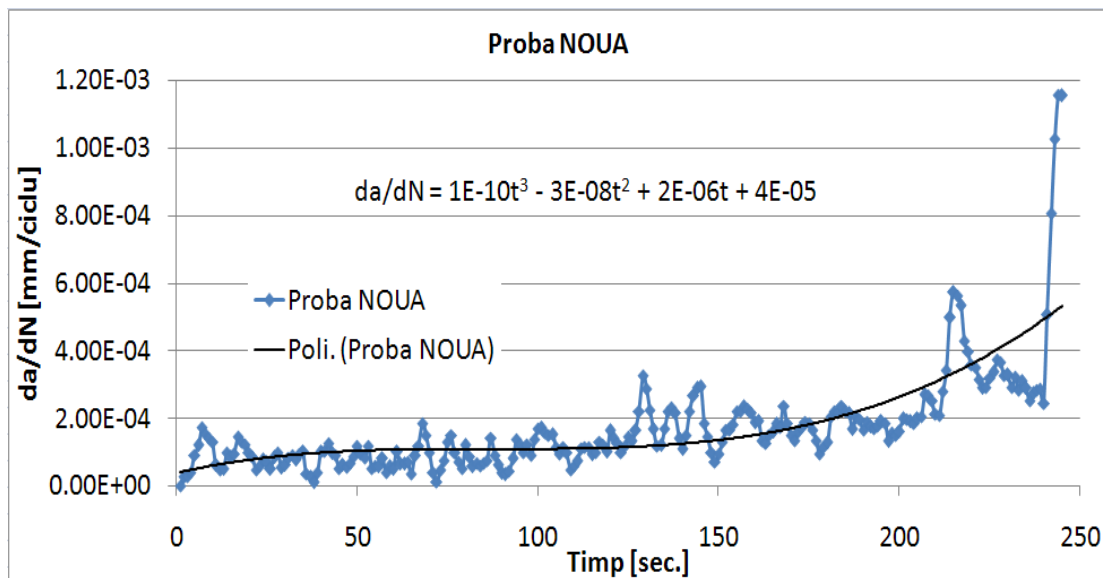


figura 3.8 Variația în timp a vitezei de propagare a fisurii – proba nouă

S-a aproximat variația da/dN în raport cu timpul cu un polinom de gradul 4. Se constată faptul că viteza de propagare a fisurii începe să crească după aprox. 123 de secunde de la începutul încercării. Ca urmare, se poate lua valoarea pentru timp de 123 de secunde ca fiind reprezentativă pentru a determina viteza de propagare a fisurii. La această valoare se înregistrează începutul creșterii vitezei de propagare a fisurii. În graficul din figura 3.7 s-a găsit pentru viteza de propagare a fisurii pentru proba '86, la timpul de 123 secunde:

$$da/dN_{șina\ NOU\tilde{A}} = 0,0000978\text{ mm/ciclu} \quad (3.2)$$

3.4.2. Concluzii

Viteza de propagare a fisurii prin oboseală (m/Gc nu trebuie să depășească valorile indicate în standardul SR EN 13674-1 ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017), valori prezentate și în tabelul 3.1.

tabelul 3.1 Extras din standardul ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017) – Viteza de propagare a fisurii prin oboseală

Marca oțelului	$\Delta K = 10 \text{ MPa m}^{1/2}$	$\Delta K = 13,5 \text{ MPa m}^{1/2}$
Toate mărcile cu excepția R200 și R320Cr	17 m/Gc=0,000017 mm/ciclu	55 m/Gc=0,000055 mm/ciclu

Din încercările și determinările realizate asupra celor trei tipuri de șină ('85; '86; NOUĂ), reiese faptul că viteza de propagare a fisurii pentru toate șinele analizate, este mai mare decât cele indicate în standardul ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017). Totuși, se constată faptul că valorile obținute pentru șina NOUĂ sunt foarte apropiate de șinele '85 și '86. În consecință, dacă avem în vedere o deteriorare a caracteristicii „viteză de propagare a fisurii” pentru șinele '85 și '86, aceasta pare a nu fi avut loc.

3.5. DETERMINAREA TENSIUNILOR REMANENTE ÎN TALPA ȘINELOR

3.5.1. Rezultate experimentale

Rezultatele experimentale sunt prezentate în graficele de mai jos.

Observații:

- I. Standardul ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017) prevede calculul tensiunilor remanente utilizând valorile deformațiilor specifice măsurate după secționarea completă a segmentului de șină cu grosimea de 20 mm;
- II. În plus față de prevederile standardului, s-au înregistrat deformațiile specifice măsurate cu puntea tensometrică pe toata durata tăierii șinei figura 3.9;
- III. Conform prevederilor standardului, numai valorile finale ale deformațiilor citite cu traductorul 2, după secționarea completă a segmentului de șină, au fost utilizate la calculul tensiunilor remanente prezentate în tabelul 3.3.

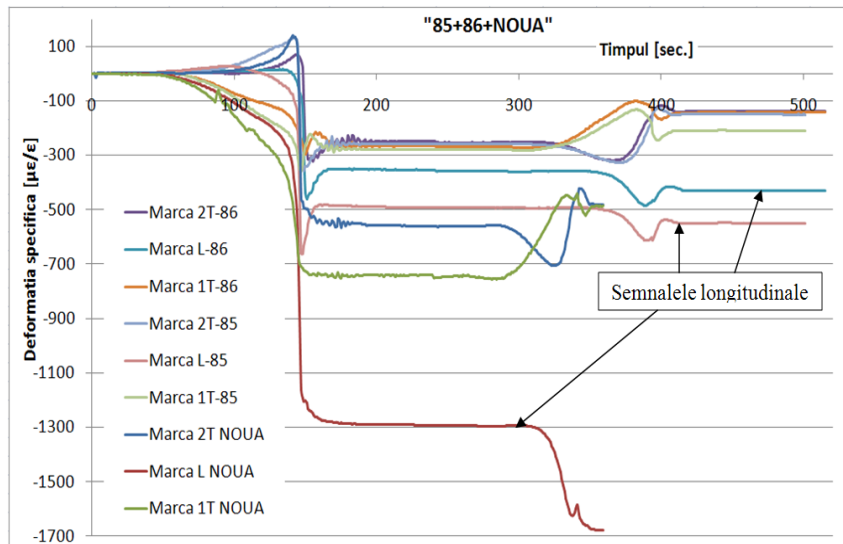


figura 3.9 Înregistrarea variației deformațiilor specifice în toate șinele pentru toate traductoarele

Tensiunile remanente sunt calculate cu deformațiile specifice indicate de înregistrări la finalul operației de tăiere a segmentului de șină cu grosimea de 20 mm. Tensiunile remanente trebuie să fie calculate pornind de la diferențele dintre prima și a doua serie de măsurări făcute cu marca tensometrică, multiplicându-le cu valoarea modului de elasticitate indicată în standard, respectiv $2,07 \times 10^5$ MPa.

În mod suplimentar, s-au determinat experimental modulele de elasticitate pe epruvete prelevate din cele trei șine. În tabelul 3.2 se prezintă tensiunile remanente determinate atât cu modulul de elasticitate mediu, prevăzut de standard, cât și cu modulele de elasticitate determinate pe epruvete prelevate din fiecare tip de șină.

tabelul 3.2 Deformațiile specifice finale (citite cu traductorul 2), tensiunile normale remanente și modulele de elasticitate determinate experimental pentru eșantioanele de șină cercetate

Șina	Deformația specifică finală, indicată de traductorul 2 [μ ϵ]	Tensiunea reziduală calculată cu modulul determinat experimental [MPa]	Tensiunea reziduală calculată cu modulul indicat de standard [MPa]	Modulul de elasticitate determinat experimental [GPa]
85-alb (1985)	-427	83,69	88,39	196
86-negru (1986)	-548	103,02	113,43	188
nouă	-1689	348,17	349,62	206,14

Observație: Numai tensiunile remanente din șina nouă depășesc limita maximă de **250 MPa**, indicată de standardul SR EN 13674-1 2011 ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017).

3.5.2. Calculul deformațiilor specifice principale, a direcțiilor principale și a tensiunilor principale

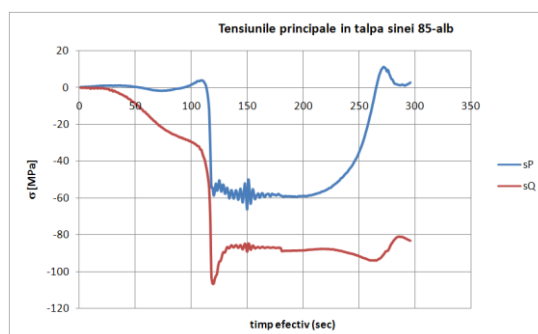


figura 3.10 Variația tensiunilor principale (maxime și minime) în timpul tăierii segmentului de șină '85-alb

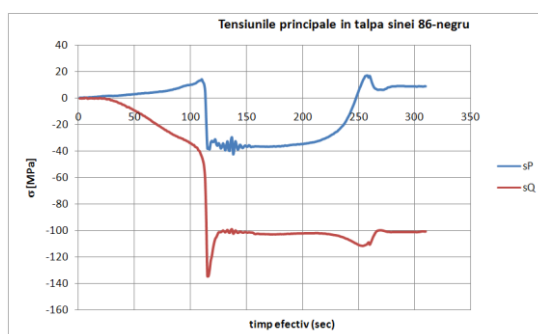


figura 3.11 Variația tensiunilor principale (maxime și minime) în timpul tăierii segmentului de șină '86-negru

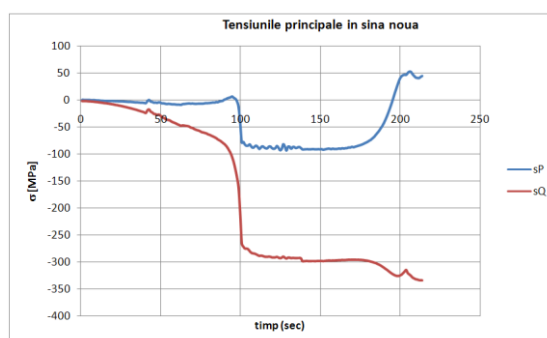


figura 3.12 Variația tensiunilor principale (maxime și minime) în timpul tăierii segmentului de șină nouă

Sintetizând, tensiunile principale în eșantioanele de șină cercetate au prezentat următoarele valori și orientări:

tabelul 3.3 Valorile tensiunilor principale determinate experimental la eșantioanele de șină cercetate

Șina	Tensiunea principală minimă calculată [MPa]	Tensiunea principală maximă calculată [MPa]	Unghiul față de axa grilei 1 θ_P^* [°]	Unghiul față de axa longitudinală a șinei [°]
85-alb (1985)	-83,25	2,71	-44,90	0,09
86-negru (1986)	-100,84	8,90	-42,71	2,28
nouă	-334,46	44,89	-44,95	0,04

* θ este măsurat de la grila 1 a rozetei la axa deformației / tensiunii principale.

3.5.3. Concluzii

S-au determinat tensiunile remanente în cupoane de șină tip 60E1, cu lungimea de 1m. Cupoanele au fost extrase din șine executate în 1985 (marcată cu vopsea albă), în 1986 (marcată cu vopsea neagră) și șină nouă (nemarcată).

Metoda de măsurare a tensiunii remanente longitudinale din talpa șinelor a respectat indicațiile ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017).

Tensiunile remanente obținute sunt indicate în tabelul 3.3. Numai tensiunile remanente din șina nouă (care sunt de 349 MPa) depășesc limita maximă de 250 MPa, indicată de standardul ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017).

Suplimentar față de prevederile standardului s-au înregistrat variațiile indicațiilor celor trei traductoare ale rozetelor tensometrice pe toată durata tăierii șinei și s-au determinat tensiunile principale (maxime și minime) și direcția acestora (tabelul 3.3 și figura 3.10-figura 3.12).

3.6. DURATA DE VIAȚĂ LA OBOSEALĂ

3.6.1. Rezultate obținute

Dispozitivul de încercare la oboseală este prezentat în figura 3.13. Se pot observa următoarele:

- s-au utilizat două contrapiulițe în vederea preluării jocurilor din filetele prevăzute în bacurile rotunde, având în vedere faptul că marea majoritate a încercărilor s-au efectuat după un ciclu alternat-simetric;
- zonele de prindere în bacurile mașinii de încercat s-au prelucrat prin frezare, în vederea alinierii atât a dispozitivelor cât și a probei de încercat cu direcția forței de încercare;
- strângerea bacurilor mașinii de încercat se realizează hidraulic, astfel încât nu există posibilități de scăpare sau alunecare a dispozitivelor din bacurile mașinii de încercat la reversul forței.

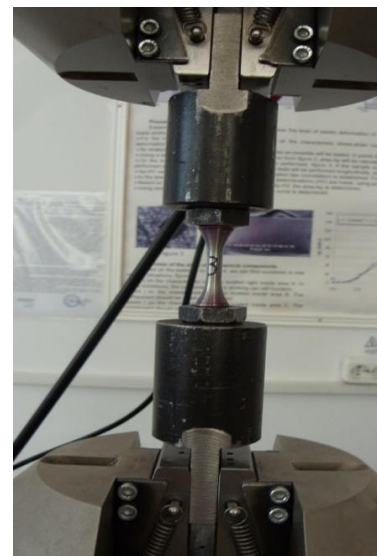


figura 3.13 Dispozitiv de prindere la solicitarea la oboseală

În aceste condiții, se poate spune că s-a realizat o aliniere corectă a axei epruvetei cu direcția forței de încercare și că toate cotele au fost strânse astfel încât nu au existat jocuri între elementele de fixare ale epruvetei.

Pe baza încercării de tracțiune s-a constatat faptul că rezistența la rupere este de aprox. $\sigma_{UTS} = 950$ MPa. În aceste condiții, tensiunea de plecare pentru încercarea primei epruvete a fost de 610 MPa

($=0,64 \sigma_{UTS}$). Prima epruvetă încercată a fost de la șina '86, iar după obținerea primelor rezultate ne-am concentrat pe o zonă mai mică de tensiuni (a se vedea încercările pentru proba NOUĂ).

În figura 3.14-figura 3.16 se observă probele solicitate la oboseală în condițiile precizate mai sus. Se fac următoarele precizări în ceea ce privește probele nerupte:

Pentru probele solicitate la oboseală din șina '85

Proba 2 a fost solicitată după un ciclu pulsant la tensiunea de 331 MPa, pentru un număr de 5 milioane de cicluri;

Probele 8 și 5 au fost solicitate după un ciclu pulsant la tensiunile de 285 MPa și respectiv 271 MPa, care au rezistat mai mult de 5 milioane de cicluri;

Proba 9 a fost solicitată după un ciclu pulsant la tensiunea de 310 MPa și a rezistat 5691298 de cicluri, fiind totuși nerelevantă, în condițiile în care la probe solicitate la tensiuni mai mici de 310 MPa s-a produs ruperea.



figura 3.14 Probele solicitate la oboseală din șina '85

Pentru probele solicitate la oboseală din șina '86

- Proba 4 a fost solicitată după un ciclu pulsant la tensiunea de 332 MPa pentru un număr de 5 milioane de cicluri;
- Proba 5 a fost după un ciclu pulsant la tensiunea 298 MPa și a rezistat 5153529 de cicluri.



figura 3.15 Probele solicitate la oboseală din șina '86



figura 3.16 Probele solicitate la oboseală din șina NOUĂ

Pentru probele solicitate la oboseală din șina NOUĂ

- Proba 3 a fost solicitată la 318 MPa și a rezistat 5153529 de cicluri.

În tabelul 3.4-tabelul 3.6 sunt prezentate rezultatele obținute în urma încercărilor la oboseală a epruvetelor confecționate din cele trei tipuri de șină: șină '85, șină '86 și șină NOUĂ.

tabelul 3.4 Rezultate obținute la oboseală pentru șina 85'

Nr. puncte	Nr. probă	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _{med} [mm]	A [mm ²]	Forța [N]	Tensiunea maximă [MPa]	Număr de cicluri
1	3	6.92	6.94	6.93	37.72	±14000	371.17	27833
2	1	6.87	6.87	6.87	37.07	±13000	350.70	87836
3	6	6.9	6.88	6.89	37.28	±12700	340.62	125320
4	7	7.06	6.94	7.00	38.48	±12000	311.81	180000
5	4	6.95	6.91	6.93	37.72	±11200	296.94	428792
6	8	6.9	6.9	6.90	37.39	±10800	288.83	5050000
7	5	6.91	6.91	6.91	37.50	±10200	271.99	5137000
	9	6.87	6.87	6.87	37.07	±11500	310.24	5691298
	2-pulsant	6.96	6.91	6.94	37.77	+12500	330.92	5000000

tabelul 3.5 Rezultate obținute la oboseală pentru șina 86'

Nr. puncte	Nr. probă	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _{med} [mm]	A [mm ²]	Forța [N]	Tensiunea Maximă [MPa]	Număr de cicluri
1	1	6.88	6.89	6.89	37.23	±22700	609.72	675
2	6	6.99	6.93	6.96	38.05	±17000	446.83	3990
3	2	6.89	6.87	6.88	37.18	±16357	439.98	4500
4	7	6.82	6.8	6.81	36.42	±13800	378.87	48000
5	8	6.91	6.93	6.92	37.61	±12400	329.70	125000
6	9	6.92	6.86	6.89	37.28	±11900	319.17	197563
7	3	6.84	6.88	6.86	36.96	±11400	308.44	370000
8	5	6.95	6.88	6.92	37.56	±11200	298.22	5163529
4-pulsant	4-pulsant	6.92	6.91	6.92	37.56	+12500	332.84	5000000

tabelul 3.6 Rezultate obținute la oboseală pentru șina NOUĂ

Nr. probă	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _{med} [mm]	A [mm ²]	Forța [N]	Tensiunea [MPa]	Număr de cicluri
1	6.85	6.85	6.85	36.85	±12500	339.19	244667
2	7.00	6.98	6.99	38.37	±12400	323	437093
3	6.84	6.88	6.86	36.96	±11750	318	5163826

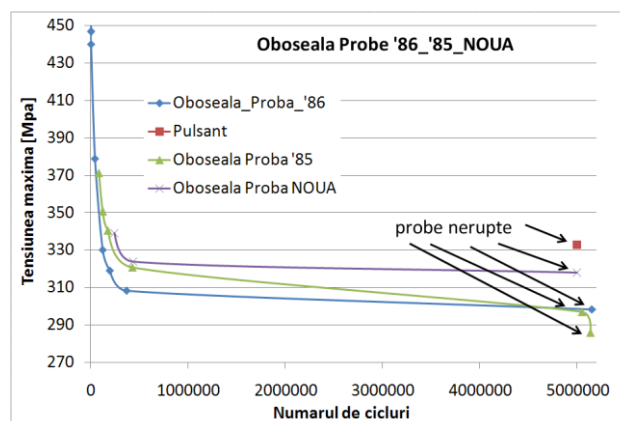


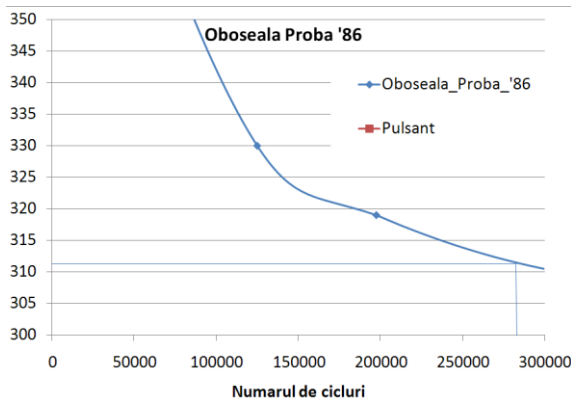
figura 3.17 Curbele Wöhler pentru probele din șina '85+ șina '86+șina NOUĂ

3.6.2. Concluzii și observații

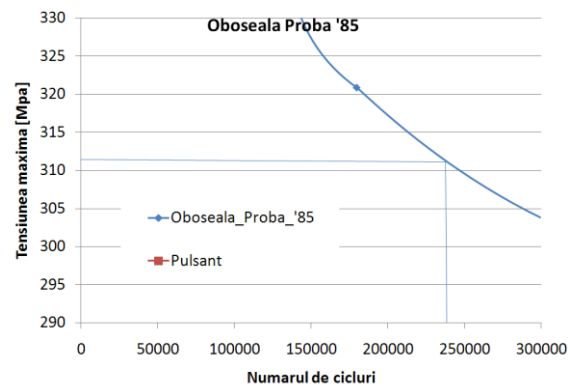
Se poate considera că limita la oboseală pentru cele trei tipuri de șină are următoarele valori:

$$\sigma_{lim_șina'85}=285 \text{ MPa}; \sigma_{lim_șina'86}=298 \text{ MPa}; \sigma_{lim_șina \text{ NOUĂ}}=318 \text{ MPa}$$

Se mai poate observa faptul că în apropierea valorii de 318 MPa, cât reprezintă limita la oboseală pentru șina NOUĂ, la celelalte șine se produce ruperea după un număr relativ mic de cicluri de solicitare: 275000, respectiv 240000 de cicluri, *figura 3.18 (a) și (b)*. În aceste condiții se poate afirma faptul că, dacă șinele '85, și '86 au avut aceleași caracteristici de rezistență la oboseală ca șina NOUĂ, acestea au suferit deteriorări în funcționare.



(a)



(b)

figura 3.18 Porțiuni din curba Wöhler pentru probele din șina '85 și șina '86.

Din punct de vedere al rezistenței la oboseală, deteriorarea D poate fi determinată de criteriul limitei la oboseală, sub forma:

$$D_{șina'85} = \frac{\sigma_{șinaNOUĂ}^{lim} - \sigma_{șina'85}^{lim}}{\sigma_{șinaNOUĂ}^{lim}} \cdot 100 = \frac{318 - 285}{318} \cdot 100 = 10,37\% \quad (3.8)$$

$$D_{șina'86} = \frac{\sigma_{șinaNOUĂ}^{lim} - \sigma_{șina'86}^{lim}}{\sigma_{șinaNOUĂ}^{lim}} \cdot 100 = \frac{318 - 298}{318} \cdot 100 = 6,28\% \quad (3.9)$$

Se constată faptul că, deteriorarea produsă prin pierderea rezistenței la oboseală în raport cu capacitatea portantă inițială, nu are valori mari, respectiv: 10,37% și 6,28%. Din acest punct de vedere se poate spune că, dacă se ia ca reper șina NOUĂ, șinele ,85' și '86 mai pot lucra o perioadă de timp, fiind supuse la solicitarea la oboseală, înainte ca deteriorarea să ajungă la valori mai mari.

3.7. VARIAȚIA DURITĂȚII ÎN DIFERITE PUNCTE DE PE ȘINA DE CALE FERATĂ

3.7.1. Variația durității în axa suprafeței de rulare a șinelor tratate termic

Relația de calcul pe baza căreia s-au determinat duritățile este următoarea:

$$HB = \frac{2 \cdot 187.5}{\pi \cdot 2.5 \cdot (2.5 - \sqrt{2.5^2 - d^2})} \quad (3.10)$$

în care:

- 187.5 reprezintă forța de apăsare în kgf;

- 2.5 este diametrul bilei de încercare;
- D este diametrul cercului de bază al calotei sferice rezultate în urma indentării.

Rezultatele încercărilor privind valorile durităților sunt prezentate în tabelul 3.7.

tabelul 3.7 Valorile durităților calculate cu relația 3.10

Nr. încercare	HBW/2.5/187.5 Șina '85	HBW/2.5/187.5 Șina '86	HBW/2.5/187.5 Șina NOUĂ
1	298.416	291.519	312.936
2	298.416	305.551	312.936
3	305.551	291.519	320.583
4	291.519	298.416	320.583
5	284.851	305.551	320.583
6	291.519	312.936	320.583
7	305.551	305.551	320.583
8	284.851	298.416	312.936
9	284.851	305.551	320.583
10	298.416	305.551	328.504
11	291.519	312.936	312.936
12	298.416	291.519	328.504
13	291.519	312.936	320.583
14	291.519	305.551	328.504
15	291.519	305.551	328.504
16	291.519	305.551	336.713
17	291.519	305.551	336.713
18	298.416	305.551	336.713
19	291.519	305.551	336.713
20	291.519	305.551	328.504
21	291.519	298.416	328.504
22	298.416	291.519	336.713
23	284.851	291.519	328.504
Valoare medie	293.379	302.533	325.171
Valoare maximă	305.551	312.936	336.713
Valoarea minimă	284.851	291.519	312.936
Diferența +	+12.172	+10.403	+11.543
Diferența -	-8.528	-11.014	-12.235

Se constată următoarele:

- Variația pozitivă este de: +12 HBW pentru șina '85, +10 HBW pentru șina '86, +11 HBW pentru șina NOUĂ.
- Variația negativă este de: -9 HBW pentru șina '85, -11 HBW pentru șina '86, -12 HBW pentru șina NOUĂ.

În consecință este respectată condiția din standardul ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017), ca valorile durităților să nu difere cu mai mult de ± 15 HBW față de media rezultatelor obținute.

3.7.2. Variația durității în punctele indicate pe suprafața transversală a ciupercii

Având în vedere prevederile din tabelul 3.3 al standardului, valorile rezultate au fost trecute în tabele asemănătoare. Astfel, tabelul 3.8-tabelul 3.10 prezintă valorile durităților Brinell calculate

cu relația 3.10 în funcție de diametrul cercului de bază al calotei sferice obținute în punctele specificate în standard.

tabelul 3.8 Valorile durițăților Brinell calculate cu relația 1 în funcție de diametrul cercului de bază al calotei sferice – proba '85

Punct de încercare	Valorile durițăților HBW/2.5/187.5	Media valorilor (HBW/2.5/187.5)
RS – punct la suprafața șinei	312.94	312.94
1	278.40	264.42
1'	254.60	
1''	260.27	
2	266.12	266.12
2'	266.12	
3	272.16	272.16
4	187.24	171.42
4'	155.61	
Media		257.4

tabelul 3.9 Valorile durițăților Brinell– proba '86

Punct de încercare	Valorile durițăților HBW/2.5/187.5	Media valorilor HBW/2.5/187.5
RS – punct la suprafața șinei	320.58	320.58
1	272.16	268.20
1'	260.27	
1''	272.16	
2	266.12	266.12
2'	266.12	
3	187.24	187.24
4	272.16	255.39
4'	238.63	
Media		271.3

tabelul 3.10 Valorile durițăților Brinell– proba NOUĂ

Punct de încercare	Valorile durițăților HBW/2.5/187.5	Media valorilor HBW/2.5/187.5
RS – punct la suprafața șinei	363.21	363.21
1	328.50	306.83
1'	363.21	
1''	228.77	
2	291.52	260.14
2'	228.77	
3	284.85	284.85
4	238.63	261.74
4'	284.85	
Media		290.3

3.7.3. Concluzii

În ceea ce privește determinarea șirurilor de durități pe suprafața căii de rulare a șinelor se pot trage următoarele concluzii:

- pentru fiecare șină în parte variația durităților este de maximum +12 HBW în raport cu valoarea medie obținută din cele 23 de încercări;
- în standardul ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017) se prevede ca valorile durităților să nu difere cu mai mult de ± 15 HBW față de media rezultatelor obținute;
- în consecință este respectată prevederea standardului privitoare la abaterea valorilor față de medie.

În ceea ce privește determinarea durităților pe secțiunea transversală a șinelor în zona ciupercii, se poate concluziona că valorile medii obținute pentru cele trei tipuri de șine sunt relativ apropiate, respectiv: 257.4 HBW (șina '85), 271.3 (șina '86) și 290.3 (șina NOUĂ).

În raport cu duritățile prezentate în standardul ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017), se constată faptul că duritățile pentru șinele '85 și '86 sunt în zona celor determinate pentru șina R260 (sau R260Mn) în timp ce duritățile pentru șina NOUĂ sunt în zona celor impuse pentru șina R320C.

În aceste condiții, se poate afirma că cele două tipuri de șine semi-bune, pot fi utilizate în continuare în exploatare, din punct de vedere al satisfacerii cerințelor de duritate.

3.8. VARIAȚIA MICRODURITĂȚII ÎN DIFERITE PUNCTE PE SUPRAFAȚA TRANSVERSALĂ A ȘINEI/BANDAJ UZAT

3.8.1. Variația microdurității în punctele indicate pe suprafața transversală a ciupercii șinei

Rezultatele obținute în urma testului de duritate:

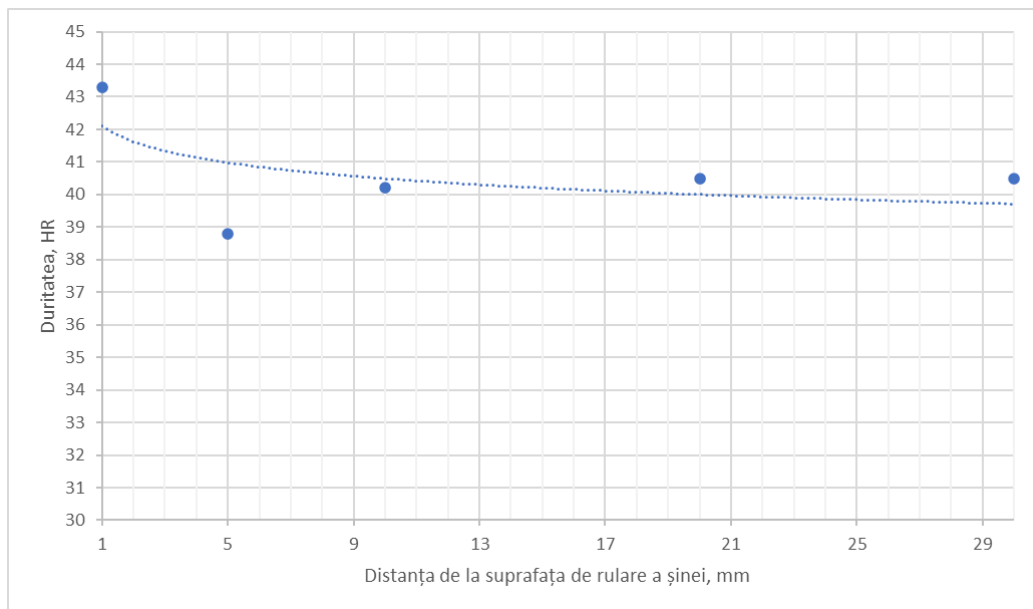


figura 3.19 Valorile medii ale durității funcție de distanța subiacent suprafeței de rulare

3.8.2. Variația microdurității în punctele pe suprafața transversală a bandajului de locomotivă

Rezultatele obținute în urma testului de duritate:

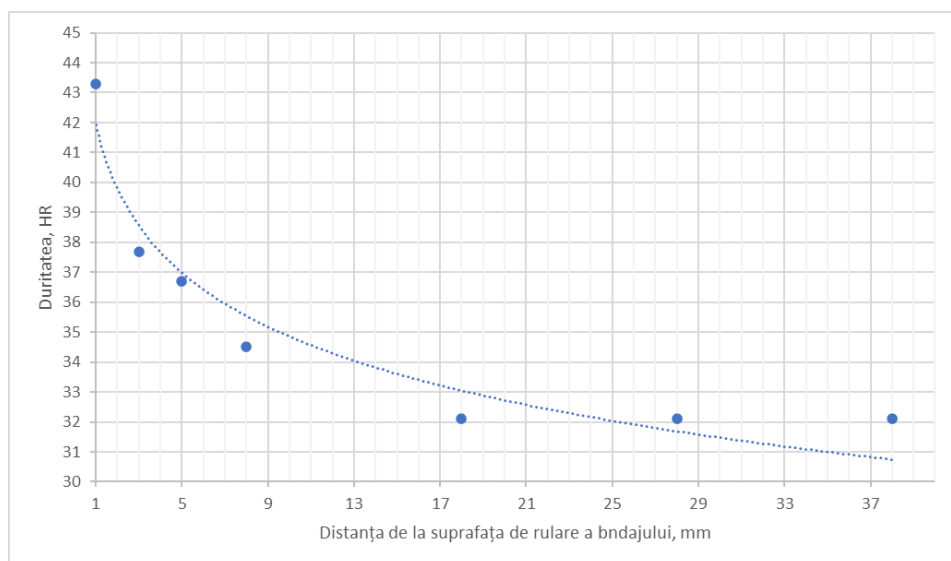


figura 3.20 Valorile medii ale durității funcție de distanța subiacent suprafeței de rulare

3.8.3. Concluzii

În ceea ce privește determinarea șirurilor de durități pe suprafața transversală a căii de rulare a șinei uzate (în zona ciupercii) și a bandajului de locomotivă uzat se pot trage următoarele concluzii:

- Tendința de bază a durității subiacent suprafeței de rulare, este creșterea durității ca efect al tensiunilor tangențiale și cele normale în zona de contact care depășesc considerabil limita de curgere a materialului, ca o consecință a forțelor de la interfața roată/șină, atât pentru șină cât și pentru bandaj.
- Creșterea durității materialului din care este confecționat bandajul este mai mare în raport cu cel din care este fabricată șina, ce arată că materialul din care este făcut bandajul suportă deformații mai mari în timpul serviciului.
- Gradientul de duritate descrește cu adâncimea subiacentă suprafeței de rulare (dacă se exclud efectele tensiunilor tangențiale și cele normale în zona de contact), care sunt în strânsă legătură cu procesul tehnologic de producție a bandajelor și cu modificările proprietăților microstructurale.
- Duritatea pe suprafața transversală a șinei în zona ciupercii variază puțin față de media din aceste zone, ce indică faptul că oțelul din care este confecționată șina poate fi considerat un material omogen și izotrop.

3.9. REZISTENȚA LA FORFECARE

3.9.1. Diagrame caracteristice și mărimile obținute la încercarea de forfecare statică

Se vor prezenta mai jos rezultatele obținute în urma încercărilor, sub formă de diagrame și tabele, și se vor lua în considerare mărimi importante, cum ar fi: modulul de elasticitate transversal, $G \cdot 10^5$ [N/mm²], energia totală consumată pentru rupere (elastică și plastică), E [J], limita de curgere (prin forfecare), τ_c [N/mm²], rezistența la rupere (prin forfecare), τ_r [N/mm²]. Valorile tabelare și curbele caracteristice vor fi prezentate în continuare așa cum au fost obținute de la mașina de încercat.

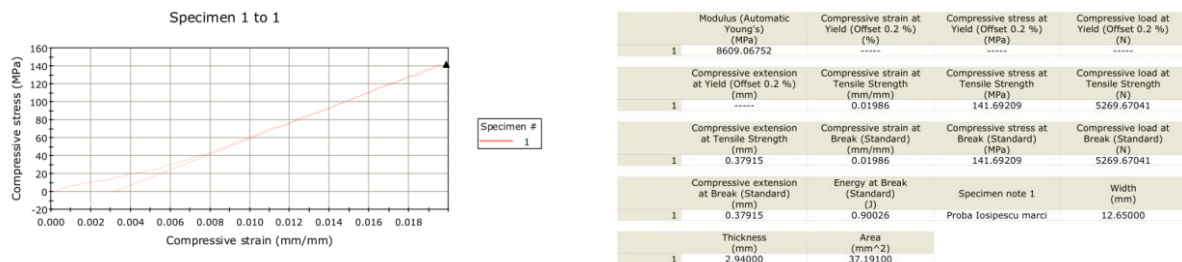
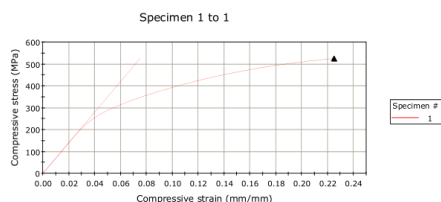
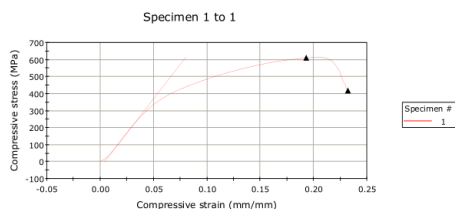


figura 3.21 Diagrama caracteristică și datele experimentale obținute pentru încercarea la forfecare obținute pentru probă nr.1 bandaj – cu marcă tensometrică



Modulus (Automatic Young's) (MPa)	Compressive strain at Yield (Offset 0.2 %) (%)	Compressive stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)	Compressive load at Yield (Offset 0.2 %) (N)
1	6995.70219	-----	-----
Compressive extension at Yield (Offset 0.2 %) (mm)	Compressive strain at Tensile Strength (mm/mm)	Compressive stress at Tensile Strength (MPa)	Compressive load at Tensile Strength (N)
1	0.22449	525.16364	18110.35547
Compressive extension at Tensile Strength (mm)	Compressive strain at Break (Standard) (mm/mm)	Compressive stress at Break (Standard) (MPa)	Compressive load at Break (Standard) (N)
1	4.27871	524.23352	18277.82578
Compressive extension at Break (Standard) (mm)	Energy at Break (Standard) (J)	Specimen note 1	Width (mm)
1	4.79581	56.5021	11.79000
Thickness (mm)	Area (mm ²)	Probe Iosipescu marci	
1	2.98500	34.86600	

figura 3.22 Diagrama caracteristică și datele experimentale obținute pentru încercarea la forfecare obținute pentru probă nr.2 bandaj



Modulus (Automatic Young's) (MPa)	Compressive strain at Yield (Offset 0.2 %) (%)	Compressive stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)	Compressive load at Yield (Offset 0.2 %) (N)
1	8035.11958	-----	-----
Compressive extension at Yield (Offset 0.2 %) (mm)	Compressive strain at Tensile Strength (mm/mm)	Compressive stress at Tensile Strength (MPa)	Compressive load at Tensile Strength (N)
1	0.19277	610.93896	21356.95898
Compressive extension at Tensile Strength (mm)	Compressive strain at Break (Standard) (mm/mm)	Compressive stress at Break (Standard) (MPa)	Compressive load at Break (Standard) (N)
1	3.97238	416.67737	14635.95605
Compressive extension at Break (Standard) (mm)	Energy at Break (Standard) (J)	Specimen note 1	Width (mm)
1	4.41543	69.10792	11.81000
Thickness (mm)	Area (mm ²)	Probe Iosipescu marci	
1	2.96000	34.95760	

figura 3.23 Diagrama caracteristică și datele experimentale obținute pentru încercarea la forfecare obținute pentru probă nr.3 șină

3.9.2. Concluzii

Prin consultarea tabelor furnizate de mașina de încercat, se pot identifica, pentru fiecare probă în parte, diverse caracteristici, precum rezistența la forfecare, limita de plasticitate și modulul de elasticitate transversal ș.a. Au fost disponibile trei probe pentru șină și două probe pentru bandaj, care au fost supuse solicitării până la rupere. Analiza rezultatelor arată următoarele:

- Valorile rezistențelor la forfecare, respectiv τ_r , sunt: 610,94 MPa pentru proba extrasă din șină, 525 MPa pentru proba extrasă din roată;
- Valorile tensiunii de curgere, respectiv τ_c , sunt: 141,692 MPa pentru proba extrasă din bandaj_1, 193,341 MPa pentru proba extrasă din bandaj_2 și dusă până la rupere și 241,8539 MPa pentru proba extrasă din șină și dusă până la rupere;
- Valoarea modulului de elasticitate transversal pentru proba extrasă din bandaj este de 80521,47 MPa, ce este cu 1,97% mai mare decât cel obținut din condiția de continuitate a corpului omogen și izotrop, deci materialul prelevat din bandaj poate fi considerat omogen și izotrop.
- Energia acumulată până la rupere (elastică și plastică, procentul cel mai mare fiind dat de energia de deformare plastică): 69,1 J pentru proba prelevată din șină, 56,06 J pentru proba prelevată din bandaj;

Prin analizarea acestor rezultate, se poate concluziona că există o diferență în capacitatea de preluare a sarcinilor exterioare și de înmagazinare a energiei de deformare între materialul de șină și cel de bandaj. Valorile ușor diferite obținute pentru caracteristicile menționate la șină față de materialul din bandaj indică faptul că există diferențe semnificative între cele două materiale. Aceste diferențe sunt cauzate de procesele de fabricare diferite și materialele utilizate pentru fiecare tip de probă.

3.10. EVALUAREA PRIN ULTRASUNETE

3.10.1. Rezultate obținute privind determinarea modului de elasticitate longitudinal, modului de elasticitate transversal și coeficientul Poisson

Prin măsurări cu US s-a obținut viteza de propagare a undelor elastice longitudinale (V_L) și viteza de propagare a undelor elastice transversale (V_T) pentru materialul din care este confecționată șina și bandajul, $V_{Ls}=5940$ [m/s], $V_{Ts}=3130$ [m/s]; $V_{Lb}=5843$ [m/s] și $V_{Tb}=3102$ [m/s] iar prin măsurări făcute cu balanța analitică s-a obținut greutatea probelor și a fost calculată densitatea materialelor din care sunt confecționate probele $\rho_s=7873,6$ kg/m³ $\rho_b=7845,046$ [kg/m³].

Coeficientul de contracție transversală este calculat cu relația:

$$\nu = \left[1 - 2 \left(\frac{V_T}{V_L} \right)^2 \right] / \left[2 - 2 \left(\frac{V_T}{V_L} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

$$\nu_s = \left[1 - 2 \left(\frac{3130}{5940} \right)^2 \right] / \left[2 - 2 \left(\frac{3130}{5940} \right)^2 \right] = 0,307$$

$$\nu_b = \left[1 - 2 \left(\frac{3102}{5843} \right)^2 \right] / \left[2 - 2 \left(\frac{3102}{5843} \right)^2 \right] = 0,303$$

unde: ν este coeficientul Poisson, mărime adimensională

V_T este viteza de propagare a undelor elastice transversale, [m/s]

V_L este viteza de propagare a undelor elastice longitudinale, [m/s]

Modulul de elasticitate transversal este calculat cu relația:

$$G = V_T^2 \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad (3.13)$$

$$G_s = V_T^2 \cdot \rho = 3130^2 \cdot 7873,6 \cdot 10^{-6} = 77136,871$$

$$G_b = V_T^2 \cdot \rho = 3102^2 \cdot 7845,046 \cdot 10^{-6} = 75488,202$$

unde: G este modulul de elasticitate transversal, [N·mm²]

ρ este densitatea materialului, [kg/m³]

Modulul de elasticitate longitudinal este calculat cu relația:

$$E = [V_L^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)] / (1 - \nu) \cdot 10^{-6} \quad (3.14)$$

$$E_s = \{ [V_L^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)] / (1 - \nu) \} \cdot 10^{-6}$$

$$= \{ [5940^2 \cdot 7873,6 \cdot (1 + 0,307) \cdot (1 - 2 \cdot 0,307)] / (1 - 0,307) \} \cdot 10^{-6} = 202244,116$$

$$E_b = \{ [V_L^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)] / (1 - \nu) \} \cdot 10^{-6}$$

$$= \{ [5843^2 \cdot 7845,046 \cdot (1 + 0,303) \cdot (1 - 2 \cdot 0,303)] / (1 - 0,303) \} \cdot 10^{-6} = 197276,397$$

unde: E este modulul de elasticitate longitudinal, [N·mm²].

3.10.2. Concluzii

Evaluarea cu US s-a realizat în vederea determinării modului de elasticitate transversal, modului de elasticitate longitudinal și coeficientul Poisson și compararea acestor rezultate cu rezultatele determinate la încercarea la tracțiune și încercarea la forfecare. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 3.11.

tabelul 3.11 Comparații ale proprietăților mecanice pentru materialul șină-roată, evaluate cu US și încercări la tracțiune/forfecare

Material	Evaluarea cu US			Încercări la tracțiune și forfecare		
	E, N/mm ²	G, N/mm ²	ν	E, N/mm ²	G, N/mm ²	ν
Șină	202244	76935	0,307	196000	80640	0,304
Bandaj	197276	75295	0,303	208300	80521	0,319

Rezultatele obținute în urma evaluării cu ultrasunete indică faptul că valorile pentru caracteristicile de interes sunt puțin diferite între materialul din șină și cel din bandaj, în comparație cu rezultatele obținute în urma încercărilor de tracțiune și forfecare prezentate anterior.

3.11. ÎNCERCAREA LA ÎNCOVOIEREA PRIN ȘOC

3.11.1. Rezultate obținute privind determinarea parametrilor la încercarea de încovoiere prin șoc (reziliența)

Rezultatele experimentale sunt prezentate și tabelul de mai jos.

tabelul 3.12 Rezultate obținute privind determinarea parametrilor la încercarea de încovoiere prin șoc (reziliență)

Proba	KCV, [daJ/cm ²]	W, [J]	β , [°]
Ș ₁	240,10	192,08	-290,1
Ș ₂	247,44	197,95	-292,3
Ș ₃	246,12	196,90	-291,9
B ₁	227,24	181,79	-286,2
B ₂	229,81	183,85	-287,0
B ₃	238,77	191,05	-289,1

3.11.2. Concluzii

Scopul încercării de încovoiere prin șoc a fost acela de a determina caracteristici specifice ale materialului care nu pot fi obținute prin alte metode de testare. Datele obținute de la mașina de încercat au inclus reziliența, energia consumată pentru ruperea probelor și unghiul poziției extreme față de axa verticală pentru fiecare probă. Au fost testate câte trei probe pentru materialul prelevat din șină și din bandaj. Rezultatele obținute au fost prezentate în tabelul 3.12 și au evidențiat următoarele diferențe între caracteristicile materialului:

- Pentru ambele materiale s-a observat un aspect cristalin, grăunțos și lucios care corespunde unei ruperi fragile;
- Valorile reziliențelor pentru materialul prelevat din șină, KCV, sunt apropiate, respectiv: 240,10 daJ/cm² pentru proba Ș₁, 247,44 daJ/cm² pentru proba Ș₂ și 246,12 daJ/cm² pentru proba Ș₃;

- Valorile reziliențelor pentru materialul prelevat din bandaj, KCV, sunt apropiate, respectiv: 227,24 daJ/cm² pentru proba B₁, 229,81 daJ/cm² pentru proba B₂ și 238,77 daJ/cm² pentru proba B₃;
- Energia consumată pentru ruperea probelor prelevate din șine sunt: 192,08 J pentru proba Ș₁, 197,95 J pentru proba Ș₂ și 196,90 J pentru proba Ș₃;
- Energia consumată pentru ruperea probelor prelevate din bandaj sunt apropiate, respectiv: 181,79 J pentru proba B₁, 183,85 J pentru proba B₂ și 191,05 J pentru proba B₃.

În urma acestor rezultate, se poate concluziona că șina și bandajul nu au aceeași capacitate de a prelua sarcinile exterioare, datorită valorilor ușor diferite pentru caracteristicile menționate în această încercare. Aceste diferențe pot fi atribuite materialelor utilizate sau diferențelor în elaborarea tehnologică.

3.12. ANALIZĂ CHIMICĂ, MICROSTRUCTURALĂ ȘI METALOGRAFICĂ

3.12.1. Analizele tehnice realizate prin microscopie electronică pe eșantioanele prelevate de pe șine

Din analiza structurilor obținute prin imagini de microscopie electronică pe cele trei categorii de probe din șină de cale ferată, la puteri de mărire de 100x, 500x, 1000x, 5000x și chiar 10000x, în zone diferite, se constată o structură omogenă cu carburi izolate în zona centrală pentru toate categoriile de materiale (șină și bandaj), și o zonă lipsită de carburi pe exteriorul șinelor de grosime relativ diferită pentru șina '85, '86 și șină NOUĂ. Astfel, șina '85 are un strat decarburat de circa 700 μm, șina '86 un strat mult mai redus de circa 300 μm, iar șina nouă un strat decarburat de circa 470 μm, ceea ce nu diferențiază în mod deosebit cele trei tipuri de structuri. De asemenea, cantitatea de oxigen, ce reprezintă cantitatea de oxizi existenți în structură, este aproximativ aceeași, de circa 1,3 % (1,28 pentru șina '85, 1,16% pentru șina '86 și 1,55% pentru șina nouă).

Analizând procentul de Mn, ca element ce imprimă o bună rezistență la uzură, s-a constatat, de asemenea, un procent apropiat de circa 1,2% (1,3 pentru șina '85, 1,15% pentru șina '86 și 1,20% pentru șina nouă).

3.12.2. Analizele probelor realizate prin difracție de raze X pe eșantioanele prelevate de pe șinele de cale ferată de tip '85, '86, NOUĂ

Analiza structurală a materialelor metalice, a compoziției fazice semicantitative, identificării fazelor din structura materialelor, textură și tensiuni de ordin II, pot fi făcute cu difractometrul x - PANalytical X'Pert PRO MRD, iar rezultatele sunt interpretate de soft-ul X'PERT PRO MRD, iar în final putem obține difractograma materialului.

În figura 3.24 este prezentată diagrama de difracție cu cele trei difractograme suprapuse din care se observă o suprapunere aproape perfectă, ceea arată că cele trei materiale nu se diferențiază foarte mult din punct de vedere structural.

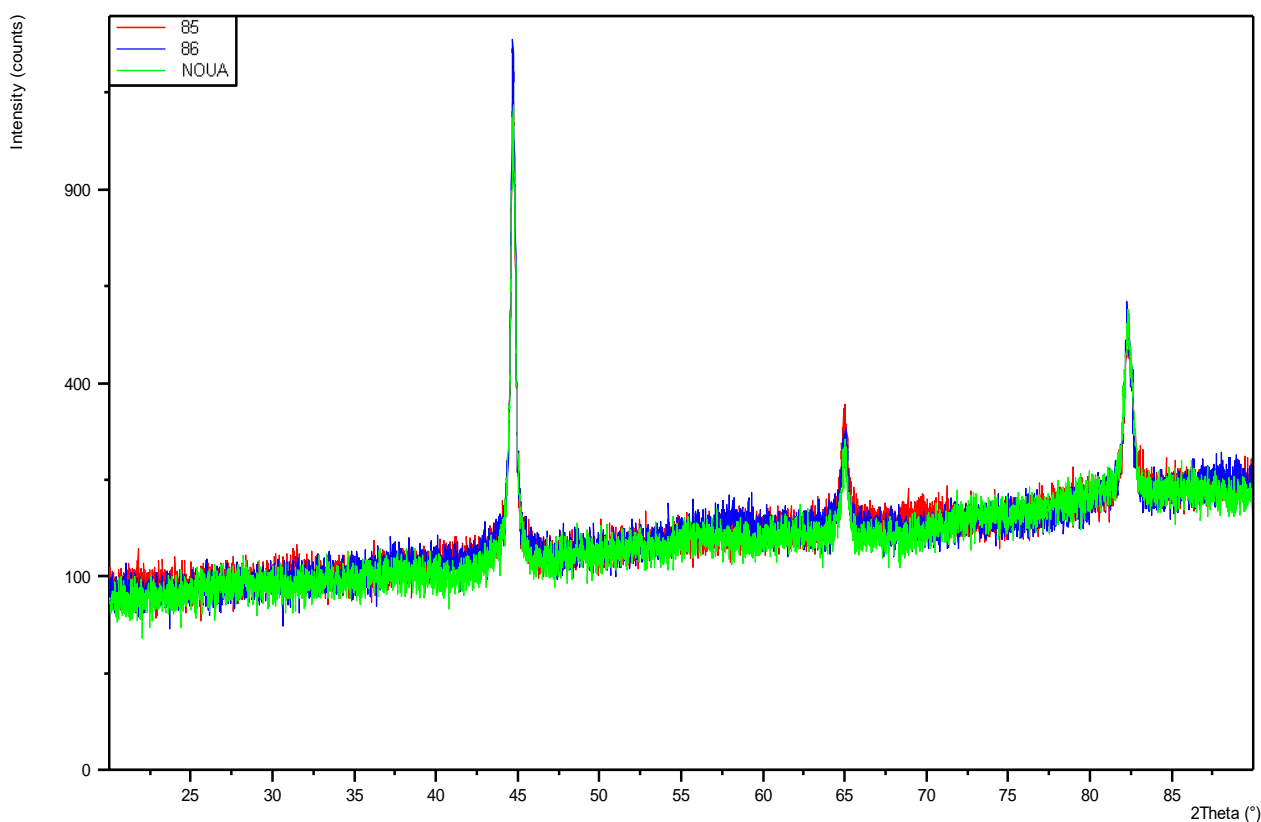


figura 3.24 Difracțiile de raze X suprapuse pentru analizele comparative

3.12.3. Analiza spectrală a eșantioanelor din șină de cale ferată pentru determinarea compoziției chimice

Prin colaborare cu facultatea de Știința și Ingineria Materialelor s-au efectuat analize spectrale pentru determinarea, evaluarea și compararea compoziției chimice ale celor trei categorii de probe din șină de cale ferată.

Din aceste analize se constată că avem o compoziție chimică conformă, compoziții foarte apropiate pentru toate cele cinci categorii de probe. Manganul, ca element important pentru păstrarea rezistenței la uzură, este de aproximativ 1% pentru toate probele iar carbonul, atât pentru probele din șină de cale ferată '85 și '86 s-a păstrat în masa probelor la valori de până la 0,9 % cu evidențierea decarburării numai pe exterior la grosimi de ordinul a câteva sute de μm și cu o valoare ușor scăzută, la 0,721% și 0,680% pentru probele de șină nouă și valori de 0,734% pentru proba prelevată din bandaj de locomotivă.

Studiul comparativ al componenței chimice medii a probelor prelevate din șine și bandaj, determinate pe baza acestei analize se prezintă mai jos, în figura 3.25.

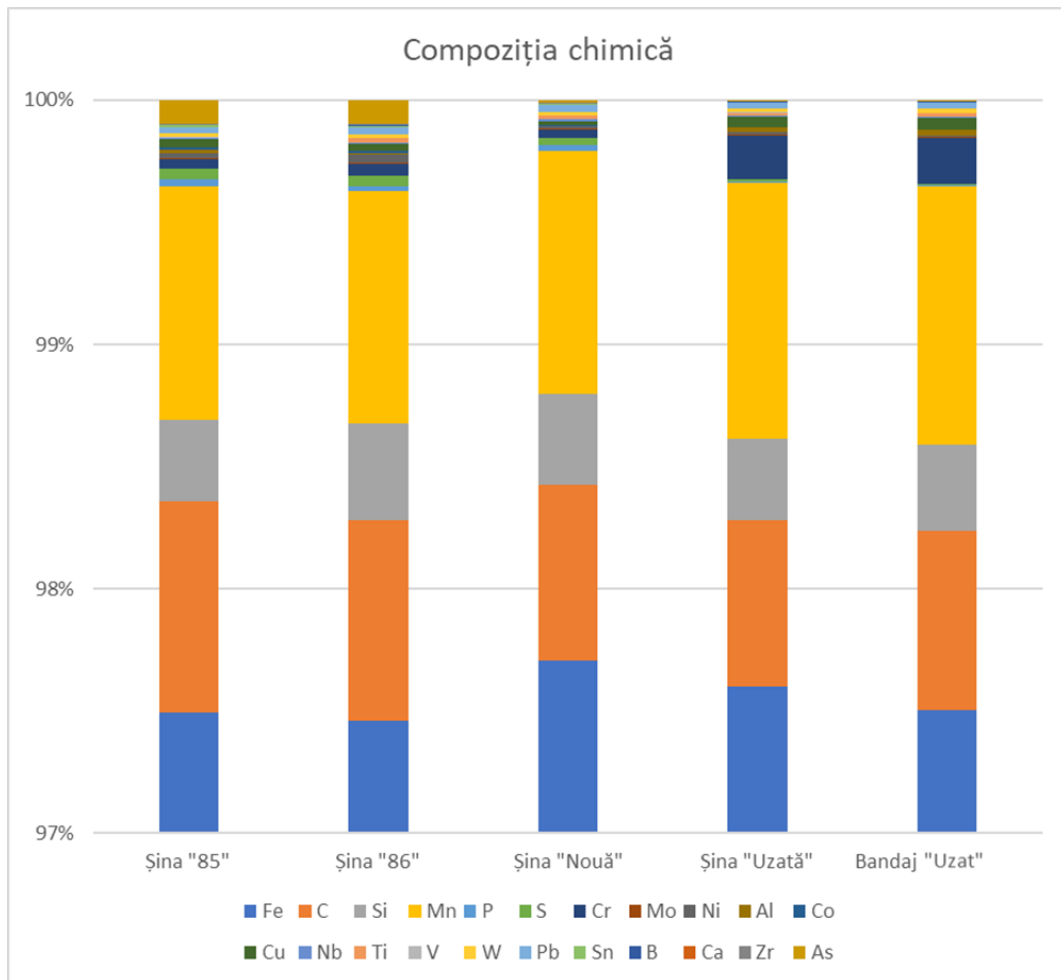


figura 3.25 Compoziția chimică medie a probelor prelevate din șine de cale ferată și bandaj de locomotivă

3.12.4. Concluzii finale asupra analizelor microstructurale ale eșantioanelor prelevate de pe șinele de cale ferată

Pentru aprecierea calității structurilor celor trei categorii de probe din șină de cale ferată, s-au efectuat următoarele analize: analize macroscopice, analize microscopice optice și electronice pentru analiza comparativă a structurilor metalografice; analize EDAX și XRD pentru determinarea compozițiilor chimice de suprafață și a compozițiilor fazice; și analize spectrale pentru determinarea și compararea compozițiilor chimice pentru fiecare categorie de probe.

Analiza macroscopică primară asupra celor trei categorii de probe evidențiază o zonă superficială decarburată și defecte pe suprafața exterioară obținută după laminare.

Prin analiza metalografică optică, se observă o structură de călire moderată de tip bainitic, în zona exterioară a probelor din șină de cale ferată, iar în zona superficială, un strat exterior relativ uniform de culoare deschisă datorat decarburării superficiale în timpul tratamentului termic aplicat, de călire moderată dar și în timpul utilizării în cazul probelor de șină utilizată timp îndelungat.

Se observă carburi izolate în masa probelor și foarte puține pentru toate categoriile de materiale sau chiar deloc în zona superficială pentru șina '85, '86 și șina NOUĂ. În cazul probei din șină nouă se constată o structură mult mai compactă și cu foarte puține defecte structurale.

Din analiza structurilor obținute prin imagini de microscopie electronică pe toate categoriile de materiale, la puteri de mărire diferite și în zone diferite, se constată o structură omogenă cu carburi izolate în zona centrală pentru toate categoriile de materiale și o zonă lipsită de carburi pe exteriorul șinelor de grosime relativ diferită pentru materialele din șina '85, '86 și șina NOUĂ. Astfel, șina '85 are un strat decarburat de circa 700 μm , șina '86 un strat mult mai redus de circa 300 μm , iar șina nouă un strat decarburat de circa 470 μm , ceea ce nu diferențiază în mod deosebit cele trei tipuri de structuri. De asemenea, cantitatea de oxigen ce reprezintă cantitatea de oxizi existenți în structură, este aproximativ aceeași, de circa 1,3%. Analizând procentul de Mn în suprafața probelor, ca element ce imprimă o bună rezistență la uzură, s-a constatat, de asemenea, un procent apropiat de circa 1,25%.

Din analiza XRD, cu difracție în masa probelor din șină de cale ferată, s-a constatat că cele trei difractograme sunt aproape suprapuse ceea ce arată că, din acest punct de vedere, cele trei structuri (șina '85, '86 și șina NOUĂ) nu se diferențiază foarte mult.

Din analizele spectrale pentru determinarea cu exactitate a compozițiilor chimice pentru fiecare categorie de probe, se constată o compoziție chimică conformă, compoziții foarte apropiate pentru toate cele cinci categorii de probe. Manganul, ca element important pentru păstrarea rezistenței la uzură, este de până la 1 % iar carbonul, atât pentru probele din șină de cale ferată '85 cât și pentru șina '86, de peste 1 % pentru bandaj și șina UIC60, iar în masa probelor la valori de până la 0,9 % (șină '85, șina '86) cu evidențierea decarburării numai pe exterior la grosimi de ordinul a câteva sute de μm și cu o valoare ușor scăzută, la 0,721% pentru probele de șină nouă.

În consecință, se poate concluziona faptul că, toate categoriile de materiale analizate atât noi cât și uzate nu au deteriorări semnificative.

3.13. CERCETĂRI EXPERIMENTALE ASUPRA CARACTERISTICILOR FIZICO-MECANICE ALE STRATURILOR SUPERFICIALE A SECȚIUNII TRANSVERSALE ȘINELOR ȘI A BANDAJULUI

3.13.1. Rezultate obținute

Testul de „scratch” s-a realizat la o forță variabilă în timp de la 0,1 la 20 N, timp de un minut pe o distanță de 10 mm la o viteză de ~ 10 mm/min. Pe fiecare probă s-au efectuat câte 2 urme de zgâriere în direcție longitudinală și transversală.

Rezultatele obținute se prezintă în figura 3.26, generate în timpul testului de scratch în direcție longitudinală și transversală, ce descrie comportamentul suprafeței în timpul mișcării indentorului cu forță crescătoare. Se observă o ușoară creștere a coeficientului de frecare care este de așteptat în

condițiile deplasării indentorului pe axa Z (pe verticală), coeficientul fiind relativ constant în raport cu creșterea forței de apăsare. Se observă variații mici ale acestui coeficient, acest lucru putând fi interpretat în corelație cu aspectul urmelor de „scratch” care nu prezintă deteriorări ale suprafețelor studiate. Din cauza rugozității pe direcția transversală se observă mai multe variații însă valoarea medie pe ambele direcții este de aproximativ 0,17 pentru proba prelevată din bandaj și 0,187 pentru probele prelevate din șine, ce denotă un comportament relativ omogen pe întreaga suprafață în ambele direcții.

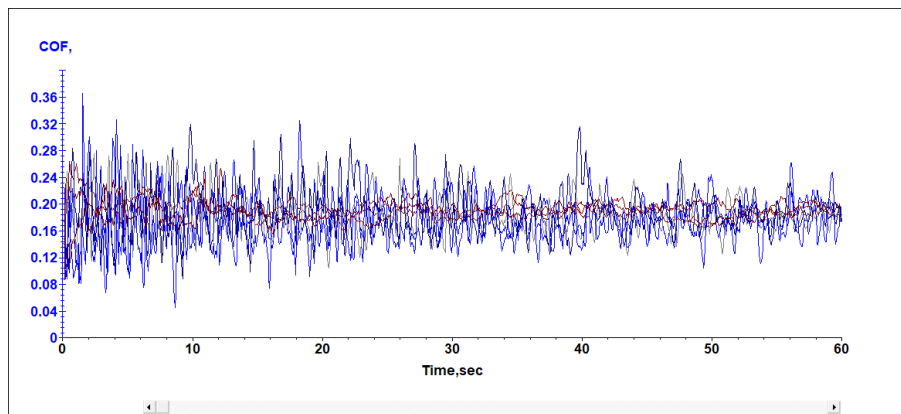


figura 3.26 Rezultatele suprapuse a coeficientului de frecare pe direcție longitudinală și pe direcție transversală (cu cafeniu respectiv albastru)

3.13.2. Concluzii și observații

În scopul evaluării unor caracteristici specifice ale materialului, s-a efectuat un test de tip „scratch”. Această determinare a furnizat date precum rezistența la zgâriere, variația coeficientului de frecare (COF), forța de apăsare, forța tangențială și alte informații relevante pentru fiecare probă în parte. Aceste date sunt esențiale pentru a putea obține o imagine clară a proprietăților materialului testat și pentru a putea face comparații între probe.

Am avut la dispoziție trei probe prelevate din șine și o probă prelevată din bandaj, testate pe direcția transversală și longitudinală.

Bazându-ne pe rezultatele prezentate mai sus, putem concluziona că materialul folosit pentru confecționarea șinelor și a bandajelor prezintă valori constante și similare pe întreaga durată a testelor de determinare a rezistenței la zgâriere și a coeficientului de frecare. Nu s-au înregistrat ruperi sau deteriorări ale materialului, iar variațiile valorilor obținute sunt datorate, în principal, rugozității suprafețelor testate. Aceste constatări sugerează un comportament omogen și izotrop al materialelor testate.

Valoarea determinată a coeficientului de frecare calculat este de 0,17 pentru proba bandaj și de 0,187 pentru probele prelevate din șine.

Valoarea coeficientului de frecare foarte apropiată pe direcție longitudinală și transversală, atât pentru materialul extras din bandaj și cât și din șină, denotă un comportament omogen și izotrop pe întreaga suprafață în ambele direcții.

3.14. DETERMINAREA COEFICIENTULUI DE FRECARĂ ȘI A UZURII LA CONTACTUL ROATĂ-ȘINĂ

3.14.1.1. Rezultatele obținute privind variația momentului de frecare, coeficientului de frecare și a uzurii funcție de alunecarea specifică

tabelul 3.13 Rezultate experimentale obținute

Încercarea	Rola	g, [g]	Uzura, [g]	COF	M, [N·mm]	Date colectate	Nr. cicluri	T _{MAX} , [°C]
I	șină	147,5794	0,0011	0,053	183,79	3,6 · 10 ³	6 · 10 ³	21
	bandaj	148,4196	0,0012					
II	șină	144,5628	0,0015	0,029	101,04			21
	bandaj	147,7108	0,0021					
III	șină	144,1907	0,0028	0,031	107,55			21
	bandaj	146,2603	0,0010					
IV	șină	146,7955	0,0125	0,192	666,65			26
	bandaj	150,5761	0,0291					
V	șină	143,9947	0,0020	0,199	230,36			22
	bandaj	148,6955	0,0063					
VI	șină	145,6002	0,0062	0,194	336,04			22
	bandaj	149,4725	0,0106					
VII	șină	146,1423	0,0089	0,190	439,87			22
	bandaj	147,6881	0,0103					
VIII	șină	144,5481	0,010	0,168	487,04	21		
	bandaj	148,4088	0,012					
IX	șină	148,0184	0,0008	0,0187	54,239	41		
	bandaj	117,6649	0,0011					
X	șină	101,9938	0,7021	0,201	580,89	40		
	bandaj	107,8575	0,8307					
XI	șină	136,5679	0,9401	0,191	664,24	35		
	bandaj	148,9	1,1468					
XII	șină	-	-	0,236	821,09	23		
	bandaj	-	-					
XIII	șină	-	-	0,219	760,48	23		
	bandaj	-	-					
XIV	șină	-	-	0,169	586,87	23		
	bandaj	-	-					



figura 3.27 Rezultatele măsurătorilor suprapuse privind coeficientul de frecare funcție de contactul contaminat cu frunze cu apă, ulei, ulei cu apă și uscat



figura 3.28 Rezultatele măsurătorilor suprapuse privind coeficientul de frecare funcție de contactul contaminat cu frunze cu apă, ulei și ulei cu apă

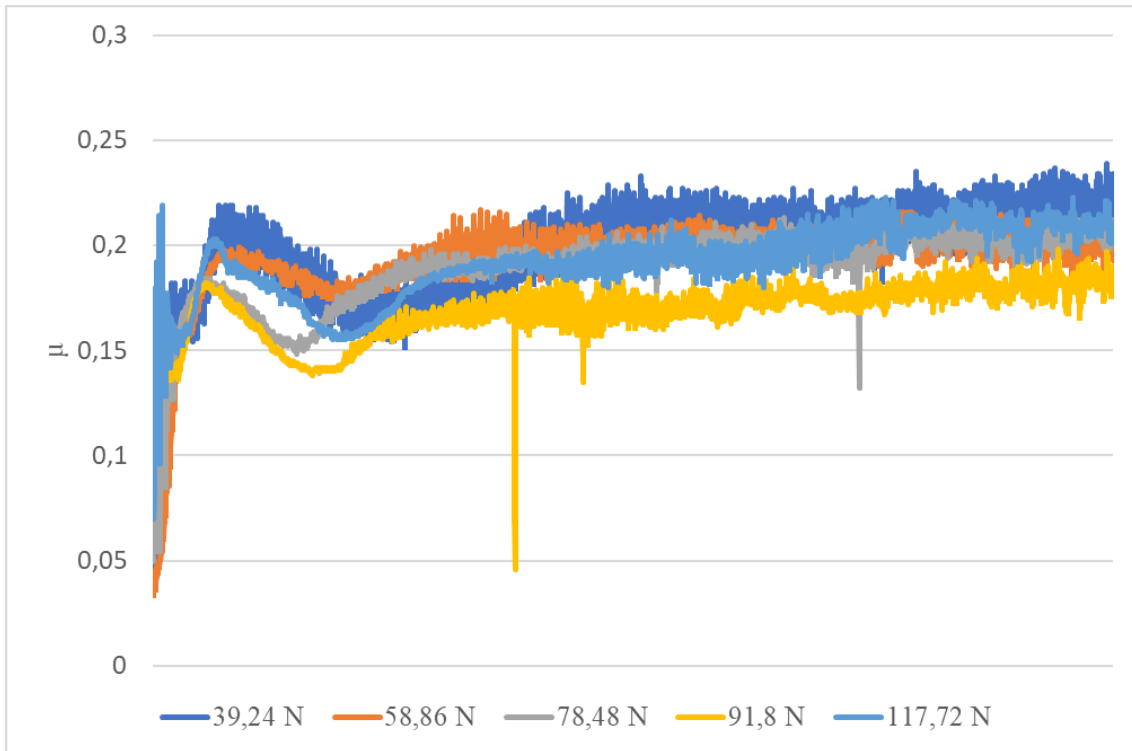


figura 3.29 Rezultatele măsurătorilor suprapuse privind coeficientul de frecare funcție de forța de apăsare

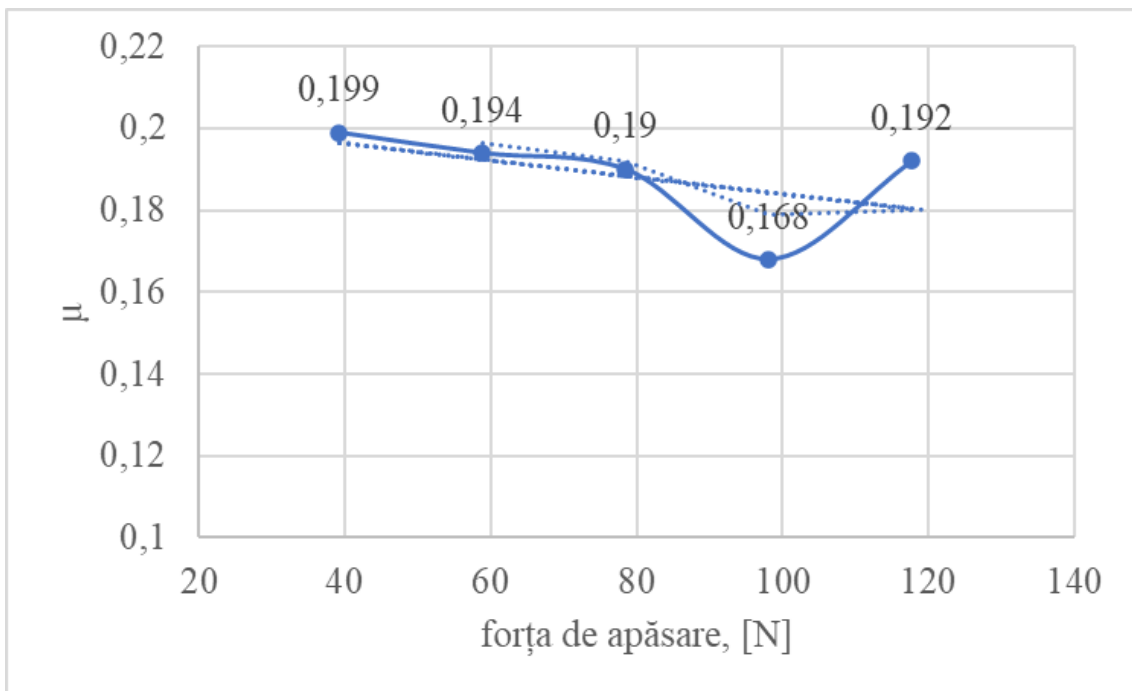


figura 3.30 Rezultatele măsurătorilor privind coeficientul de frecare mediu funcție de forța de apăsare

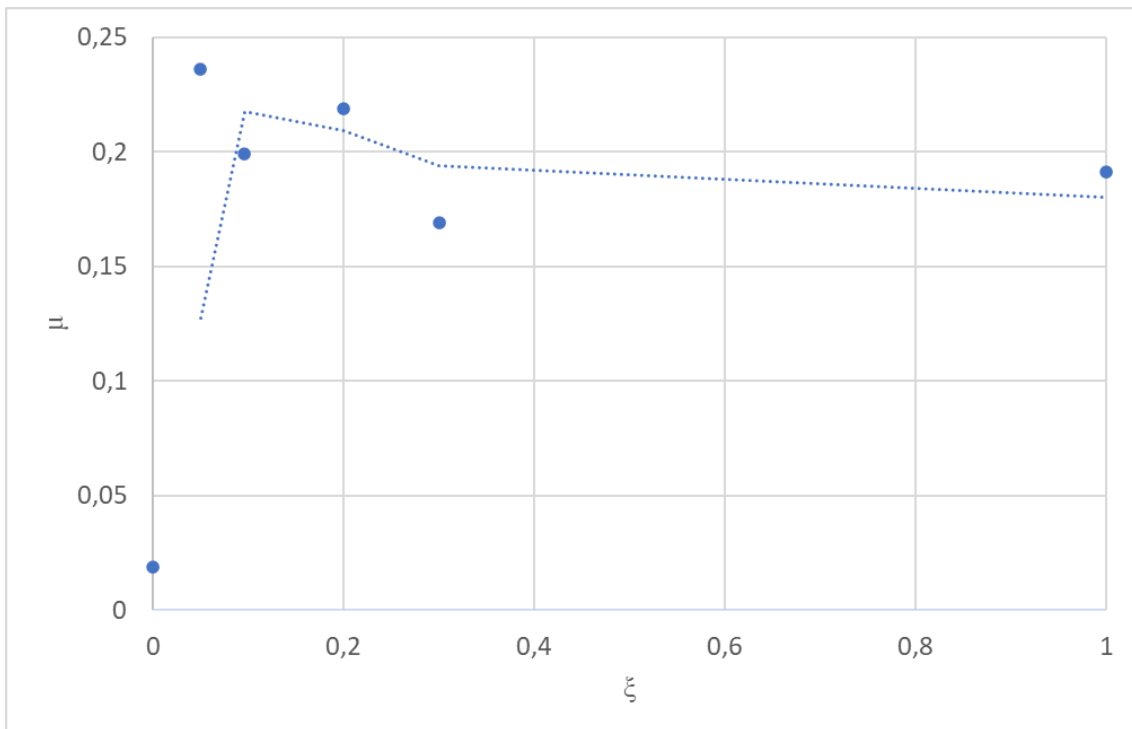


figura 3.31 Modificarea coeficientului de frecare funcție de alunecarea specifică

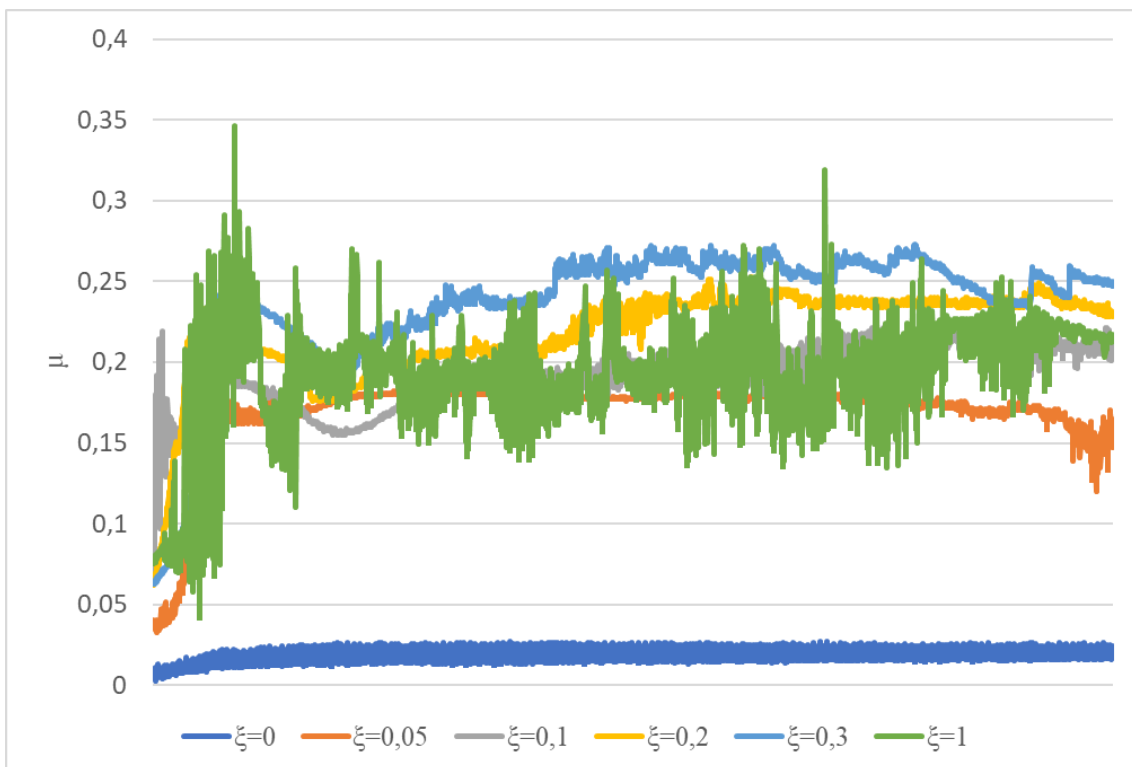


figura 3.32 Rezultatele măsurătorilor suprapuse privind coeficientul de frecare funcție de alunecarea specifică (ξ)

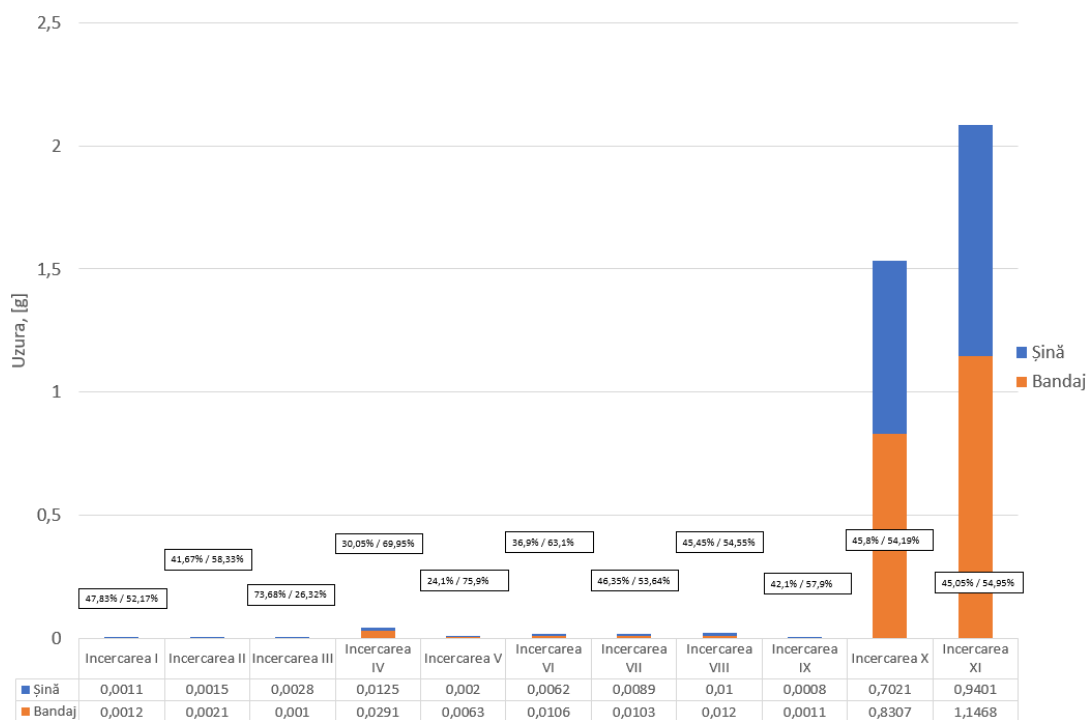


figura 3.33 Rezultatele măsurătorilor privind uzura roleur pentru încercările I-XI

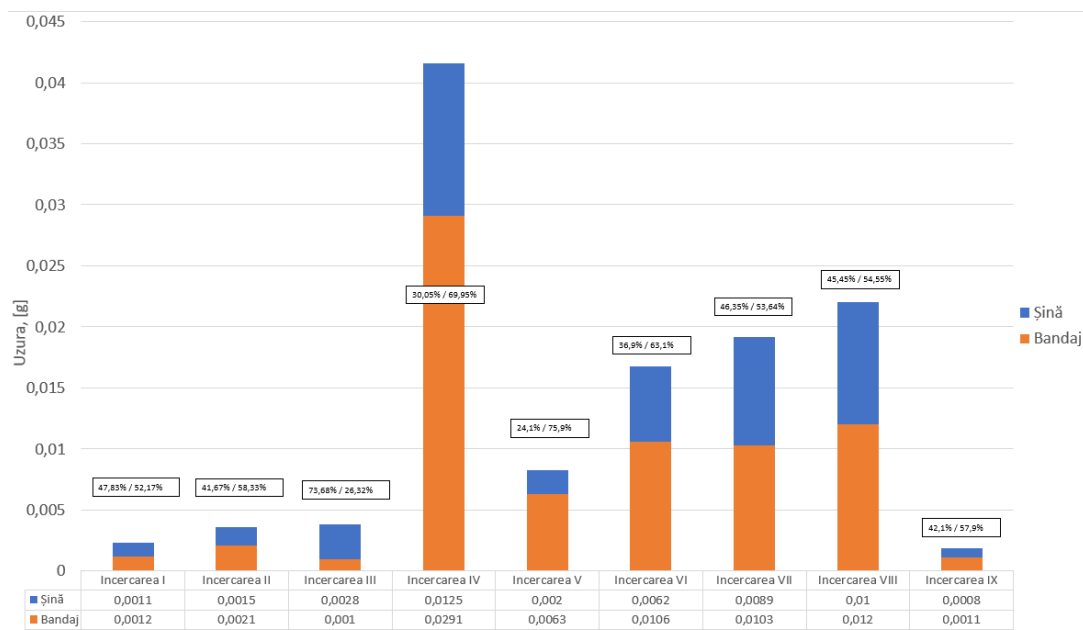


figura 3.34 Rezultatele măsurătorilor privind uzura roleur pentru încercările I-IX

3.14.2. Concluzii

În cadrul acestui studiu au fost supuse cercetării tribologice materiale prelevate din bandaj și șină de cale ferată. Am avut la dispoziție șapte perechi de role, care au fost testate în vederea determinării coeficientului de frecare și a uzurii în cuplele de clasa I și clasa a III-a, pentru diverse regimuri de funcționare: contact contaminat cu materiale terțe, alunecări specifice și variații ale forței de apăsare. Astfel, din datele experimentale furnizate de tribometru și balanța analitică, se pot observa, pentru fiecare încercare în parte, o serie de caracteristici cum ar fi: valorile maxime, minime

și medii ale momentului de frecare; valorile maxime, minime și medii ale coeficientul de frecare; uzura calculată pentru fiecare rolă în parte, parametrii statistici ș.a. Rezultatele obținute sunt trecute în tabelul 3.13, din care se constată următoarele:

- Valorile medii ale coeficientului de frecare în funcție de sarcina de apăsare, sunt apropiate, ce denotă faptul că forța de apăsare are o influență nesemnificativă asupra coeficientului de frecare;
- Sunt vizibile diferențe semnificative în ceea ce privește a doua serie de încercări, și anume pentru cazurile în care contactul este contaminat cu materiale “terțe”, coeficientul de frecare pentru cazul contactului uscat fiind de șapte ori mai mare față de contactul contaminat cu ulei sau ulei cu apă și de două ori mai mare față de cazul când contactul este contaminat cu apă și frunze;
- Prezența alunecării specifice în contact influențează semnificativ forța tangențială;
- Rezultatele de uzură sunt obținute după curățarea cu aer comprimat a suprafețelor rolor, observându-se că uzura maximă este obținută pentru cuplele de clasa a III-a;
- Forța de apăsare influențează semnificativ uzura rolor, cu cât forța este mai mare cu atât uzura este mai intensă;
- Materialul prelevat din bandaj se uzează mult mai intens față de cel prelevat din șină, cu aprox. 5% sau mai mult, pentru toate seriile de măsurători;
- Deteriorări și uzuri semnificative ale suprafețelor de rulare au fost observate pentru încercările I, X și XI, unde s-au observat piting și ruperi de material; de asemenea, la aceste încercări, în timpul măsurătorilor s-a observat o rulare greoaie a rolor în tandem cu fluctuații semnificative a coeficientului de frecare, zgomot și vibrații;
- S-a creat un model cu elemente finite în vederea estimării uzurii pentru care s-au folosit datele obținute în urma testelor tribologice, s-au validat rezultatele obținute prin AEF cu cele obținute prin experimente. Modelarea uzurii prin metoda AEF necesită o schemă de extrapolare iar identificarea acestei scheme depinde de proprietățile obținute în cadrul măsurătorilor.

3.15. MODELAREA CONTACTULUI ROATĂ-ȘINĂ PRIN METODA FOTOELASTICĂ ȘI METODA ELEMENTELOR FINITE

3.15.1. Compararea rezultatelor obținute prin metoda fotoelastică și AEF

Pentru a evidenția valorile obținute pe cale experimentală și numerică, s-a făcut comparație între rezultatele obținute pentru punctele stabilite în timpul experimentului, diferența dintre tensiunile principale ($\sigma_1 - \sigma_2$), din care au rezultat graficele prezentate în figura 3.35-figura 3.38. Putem observa o bună coerență între valorile obținute prin analiza stării de tensiuni cu ajutorul tehnicii fotoelasticității și a analizei cu elemente finite (AEF).

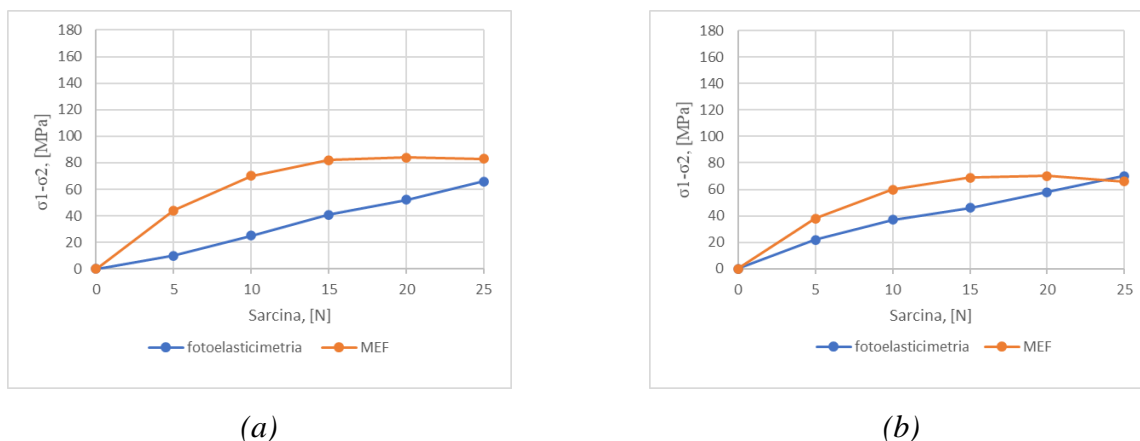


figura 3.35 Variația tensiunilor ($\sigma_1 - \sigma_2$) în raport cu valoarea forțelor de solicitare pentru cazul I, (a) – șină și (b) bandaj, determinată prin tehnica fotoelasticității și metoda cu elemente finite

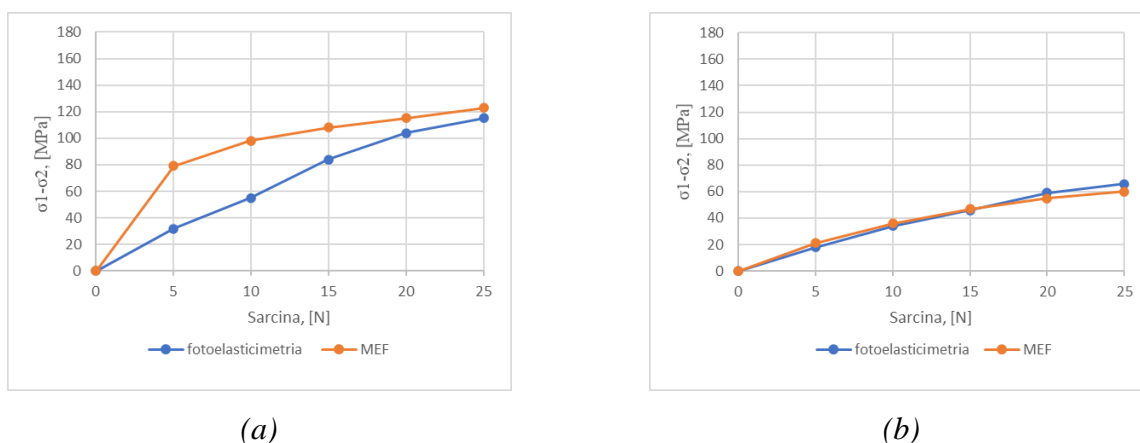
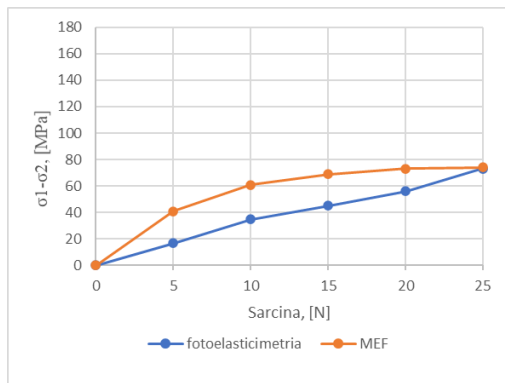
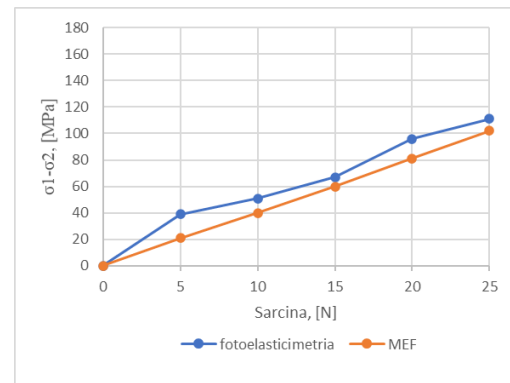


figura 3.36 Variația tensiunilor ($\sigma_1 - \sigma_2$) în raport cu valoarea forțelor de solicitare pentru cazul II, (a) – șină (cu concentrator de tensiune) și (b) bandaj, determinată prin tehnica fotoelasticității și metoda cu elemente finite

Aceste două metode oferă posibilitatea să relaționăm rezultatele obținute cu ajutorul acestor două metode și ne oferă o viziune mai amplă asupra contactului roată/șină. Atutul metodei cu elemente finite fiind posibilitatea de a optimiza designul roții și a șinei de cale ferată.

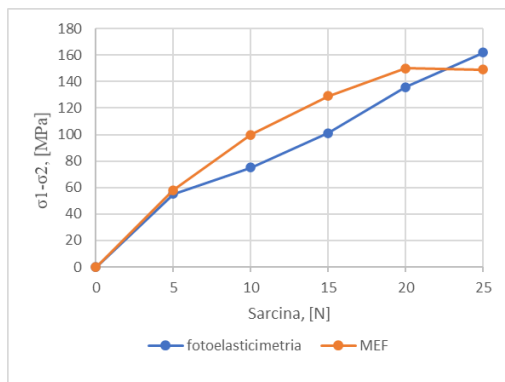


(a)

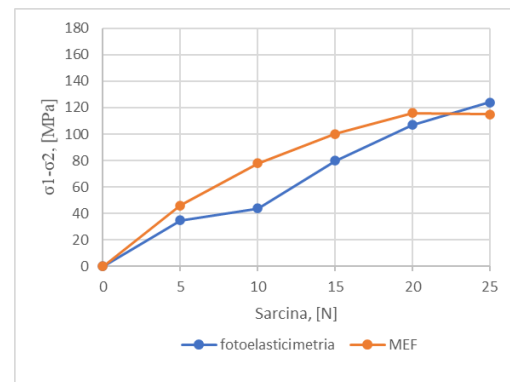


(b)

figura 3.37 Variația tensiunilor ($\sigma_1-\sigma_2$) în raport cu valoarea forțelor de solicitare pentru cazul II, (a) – șină și (b) bandaj (cu concentrator de tensiune), determinată prin tehnica fotoelasticității și metoda cu elemente finite



(a)



(b)

figura 3.38 Variația tensiunilor ($\sigma_1-\sigma_2$) în raport cu valoarea forțelor de solicitare pentru cazul II, (a) – șină și (b) bandaj ambele fragmente având concentrator de tensiune, determinată prin tehnica fotoelasticității și metoda cu elemente finite

3.15.2. Concluzii

Metoda elementelor finite este o tehnică utilă pentru evaluarea interacțiunii dintre bandaj și șină din punct de vedere mecanic. Această tehnică a fost validată prin analiza stării de tensiuni cu ajutorul tehnicii fotoelasticității, realizând o bună coerență a rezultatelor privind diferența valorilor tensiunilor principale privind ambele tehnici, și ținând cont de limitările tehnicii fotoelasticității.

Utilizarea unor tehnici combinate la investigarea stării de tensiune în structuri de rezistență permite o evaluare mai precisă a zonelor puternic solicitate și analiza aprofundată a distribuției tensiunilor.

Ambele tehnici au fost utilizate pentru a evalua patru cazuri cu și fără concentratori de tensiune în fragmentele prelevate din bandaj și șină. S-a observat o creștere semnificativă a tensiunilor pentru cazurile în care au fost prezenți concentratorii de tensiune.

Zonele cele mai solicitate sunt din vecinătatea contactului roată-șină fiind distribuite pe un volum mic de material.

3.16. DUALITATEA ÎNCERCĂRILOR, DETERMINĂRILOR ȘI ANALIZELOR

3.16.1. Managementul riscului în implementarea șinelor ce au fost în exploatare

Harta desfășurată a indicatorilor de risc, privind implementarea șinelor ce au fost deja în exploatare este prezentată în figura 3.39. Prezintă totalul punctajelor între 1 și 100 alocat pentru fiecare din cei șapte factori de risc identificați și explicați în subcapitolele anterioare, și anume: rezistența la tracțiune, notat în tabel cu litera „A”, este punctajul acordat la sută din valoarea obținută pentru șina nouă; tenacitatea la fisurare, notat cu „B”, este punctajul acordat la sută din valoarea obținută pentru șina nouă; viteza de propagare a fisurii, notat cu „C”, este punctajul acordat la sută din valoarea obținută pentru șina nouă; tensiunea remanentă din talpa șinei, notat cu „D”, este punctajul acordat la sută din valoarea impusă de standard; durata de viața la oboseală, notat cu „E”, este punctajul acordat la sută din valoarea impusă de standard; duritatea obținută în axa suprafeței de rulare, notat cu „F”, este punctajul acordat la sută din valoarea obținută pentru șina nouă; duritatea obținută în punctele indicate pe suprafața transversală a ciupercii, notat cu „G”, este punctajul acordat la sută din valoarea obținută pentru șina nouă. Rezultatele punctajelor acordate sunt trecute în tabelul 3.14 pentru șina '85 și respectiv șina '86, în scopul de a identifica riscurile potențiale pentru materialele studiate.

tabelul 3.14 Punctajele alocate pentru fiecare din cei șapte factori de risc privind șina '85 și '86

	A	B	C	D	E	F	G
șina 85	97	78	100	100	89	90	88
șina 86	99	85	100	100	93	93	93

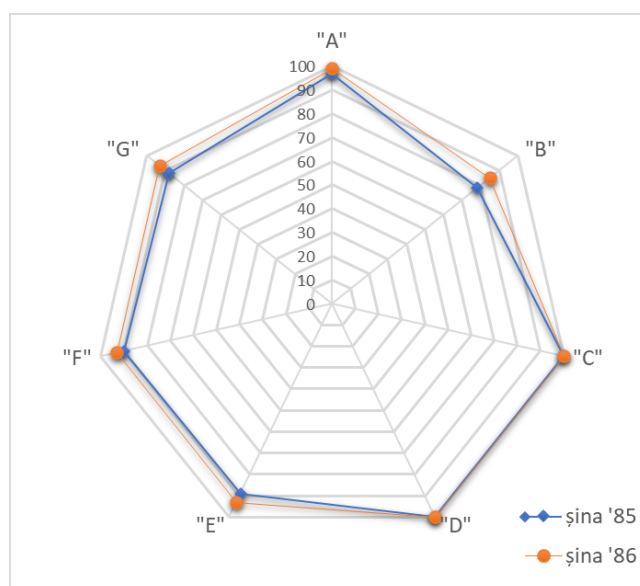


figura 3.39 Punctajele alocate pentru fiecare din cei zece factori de risc

CAPITOLUL 4: MODELAREA CONTACTULUI ROATĂ/ȘINĂ PRIN METODA AEF ÎN REGIM STATIC

4.1. MODELAREA CONTACTULUI HERTZIAN/NE-HERTZIAN, VALIDAREA MODELELOR AEF

Validarea modelelor AEF s-a făcut prin compararea rezultatelor de aici cu cele obținute prin utilizarea algoritmilor recunoscuți din literatura de specialitate cât și cu rezultatele obținute utilizând relațiile clasice a contactului concentrat hertzian. S-a realizat compararea pentru cazul interacțiunii sferă-sferă, cilindru-cilindru și roată-șină.

4.1.1. Comparații pentru cazul contactului ne-hertzian

Pentru comparații între modelul numeric creat și rezultatele găsite în literatura de specialitate, au fost generate modele AEF care conțin următoarele date de intrare: modulul Young: $2.1 \cdot 10^5$ MPa, coeficientul Poisson: 0.28, sarcina pe roată 90 kN; roată cu diametrul de 920 mm, și profilul roții S1002; șina S49, înclinată la 1/40, 1/30, 1/20 rad.; ecartamentul căii de 1435 mm; distanța dintre fețele interioare ale celor două roți de 1360 mm; deplasarea laterală a osiei montate de: 3; 2; 1; 0; -1; -2; -3; -4 și -5 mm; unghiul de atac fiind 0° ; coeficientul de frecare $\mu=0$.

Modelele AEF conțin între 60000-400000 de noduri și 56000-370000 de elemente, în funcție de numărul de puncte de contact sau aria potențială de contact, lungimea elementului în zona de contact fiind de aprox. 0,3 mm. După efectuarea calculelor s-au obținut valorile maxime ale presiunii de contact care au fost trecute în tabelul 4.1. Aceste valori au fost comparate cu rezultatele obținute de (C. I. Bărbîntă, 2014). Imaginile ce conțin rezultatele obținute și înserate în tabel pentru toate scenariile AEF sunt prezentate în subpunctul ce urmează.

tabelul 4.1 Presiunea maximă pentru roată cu profil S1002, șină S49 înclinată la 1/40, 1/30, 1/20 rad. conform modelului elastic

	Deplasarea laterală a osiei montate, mm								
	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4	-5
Tehnica DC-FFT (1/40), MPa (C. I. Bărbîntă, 2014)	803	1104	1361	1497	1512	1441	1279	2988	3777
AEF (1/40), MPa	853,86	1005,2	1243,6	1372,3	1557,4	1373,6	1377,8	1611,1	2272,6
Tehnica DC-FFT (1/30), MPa (C. I. Bărbîntă, 2014)	1153	1027	844	1037	1350	1461	1391	2261	3755
AEF (1/30), MPa	1079,5	1063,6	977	1049	1305,1	1378,3	1381	1511,2	2246
Tehnica DC-FFT (1/20), MPa (C. I. Bărbîntă, 2014)	1847	1813	1777	1710	1660	1568	1466	1086	2758
AEF (1/20), MPa	1402,1	1398,8	1434,6	1399,2	1407,3	1379,6	1232,1	1203,5	2090,8

4.2. INFLUENȚA ÎNCLINĂRII ȘINEI ASUPRA STĂRII DE TENSIUNI, DEFORMAȚII, DEFORMAȚII SPECIFICE ȘI DISTRIBUȚIEI DE PRESIUNI

4.2.1. Modelul AEF

Folosind modelul AEF descris în subpunctul anterior au fost obținute valorile pentru următoarele scenarii de interacțiune:

- Roată cu profil S1002 – șină tip S49 pentru un model 3D, înclinarea șinei de 1/40, 1/30 și 1/20, conform modelului elastic, frecarea egală cu 0, rezultând imagini pentru valori ale deplasării laterale a osiei montate de 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, -4 și -5 mm, ale deformațiilor totale, starea deformații specifice totale, starea de tensiuni von-Mises și tensiuni tangențiale maxime conform criteriului Tresca.

4.2.2. Rezultate obținute

În figura 4.1 se prezintă valorile ariei de contact pentru înclinarea șinei la 1/40, 1/30 și 1/20 funcție de deplasarea laterală a osiei montate. Aceste valori variază funcție de înclinarea șinei și deplasarea laterală a osiei montate. Din figură se observă valori mai mari ale ariei de contact pentru înclinarea șinei la 1/40, cele mai mici fiind pentru înclinarea șinei la 1/20.

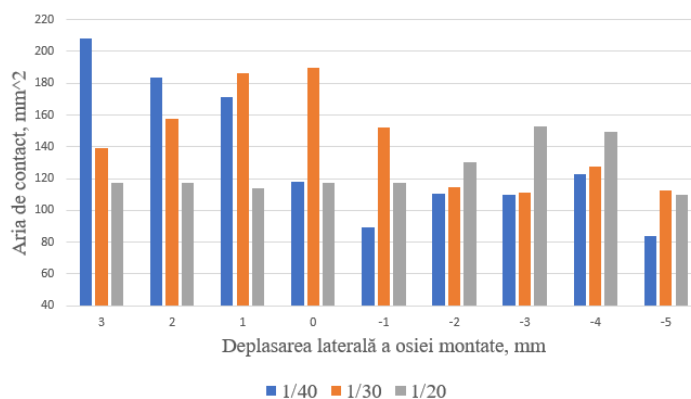


figura 4.1 Comparație între aria de contact pentru înclinarea șinei la 1/40, 1/30 și 1/20 funcție de deplasarea laterală a osiei montate

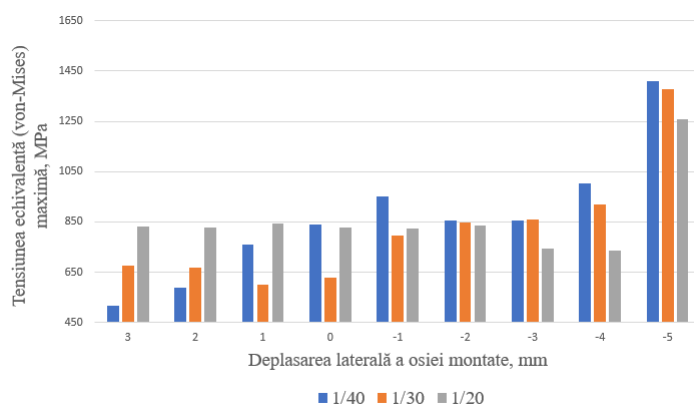


figura 4.2 Comparație între tensiunea echivalentă (von-Mises) maximă pentru înclinarea șinei la 1/40, 1/30 și 1/20 funcție de deplasarea laterală a osiei montate

Aria de contact este în strânsă legătură cu starea de tensiuni și distribuția de presiuni, cu cât aria este mai mare cu atât valorile tensiunilor și a presiunilor sunt mai mici. În figura 4.2 se prezintă tensiunea maximă echivalentă (von-Mises) pentru înclinarea șinei la 1/40, 1/30 și 1/20 funcție de deplasarea laterală a osiei montate. Tensiunile maxime în funcție de înclinarea șinei sunt calculate pentru deplasarea laterală a osiei montate la -5 mm, valorile maxime fiind de: 2272,6 MPa, 2246 MPa și 2090,8 MPa pentru înclinarea șinei la 1/40, 1/30 respectiv 1/20.

O comparație între presiunea maximă pentru înclinarea șinei la 1/40, 1/30 și 1/20 funcție de deplasarea osiei montate este prezentată în figura 4.3. Din figură se pot observa presiuni relativ mai mici pentru înclinarea șinei la 1/40, presiuni mai mari pentru înclinarea la 1/20.

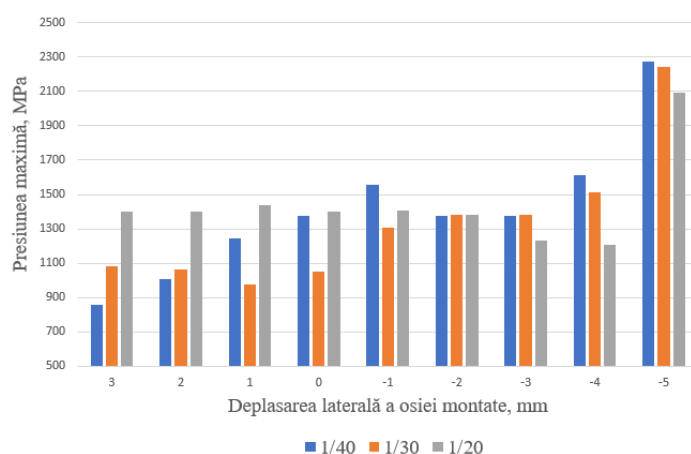


figura 4.3 Comparație între presiunea maximă pentru înclinarea șinei la 1/40, 1/30 și 1/20 funcție de deplasarea laterală a osiei montate

Din rezultatele obținute se poate remarca faptul că, valori mai mici ale tensiunilor și ale presiunilor au fost obținute pentru scenariul în care șina este înclinată la 1/40.

Deplasarea laterală a osiei montate influențează locația punctului de contact. Locația la rândul său influențează tensiunile și presiunile de contact. Pentru deplasarea laterală a osiei la -4 și -5 mm se obțin cele mai mari valori ale tensiunii și presiunii de contact. De asemenea, în aceste locații, tensiunea maximă este mai aproape de suprafața de contact.

Creșterea valorii relative a maximului tensiunii echivalente, creșterea deformațiilor specifice totale și apropierea de suprafața de contact a punctului de maxim, influențează negativ durabilitatea la oboseala de contact a roții și a șinei, care funcționează sub o solicitare de contact cu rostogolire.

În figurile de mai jos se prezintă o serie de rezultate obținute.

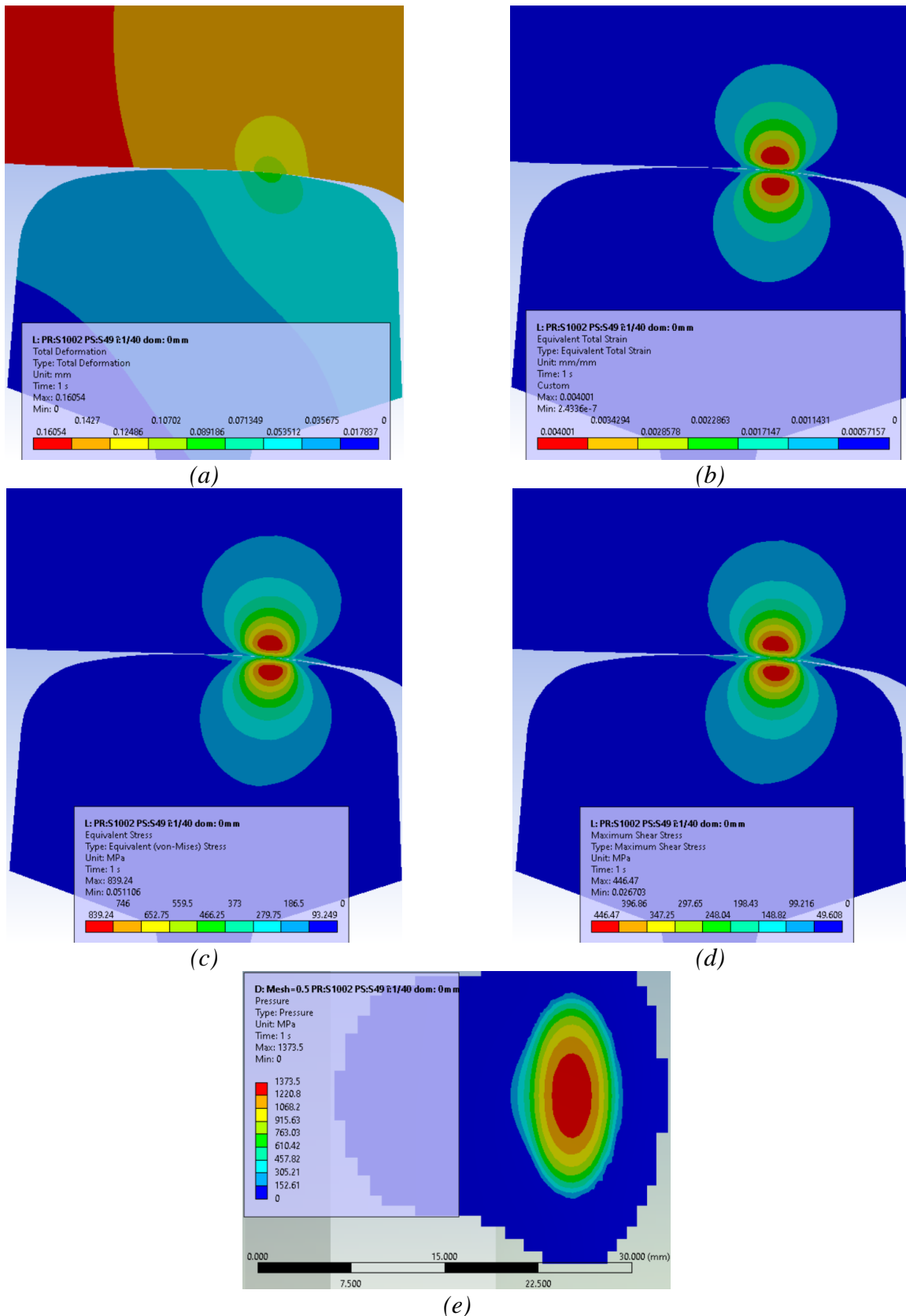


figura 4.4 Rezultatele obținute pentru o roată cu profil S1002 și șină S49 înclinată la 1/40 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm: (a) deformații totale; (b) starea de deformații specifice totale; (c) starea de tensiuni von-Mises; (d) starea de tensiuni tangențiale maxime; (e) distribuția de presiuni

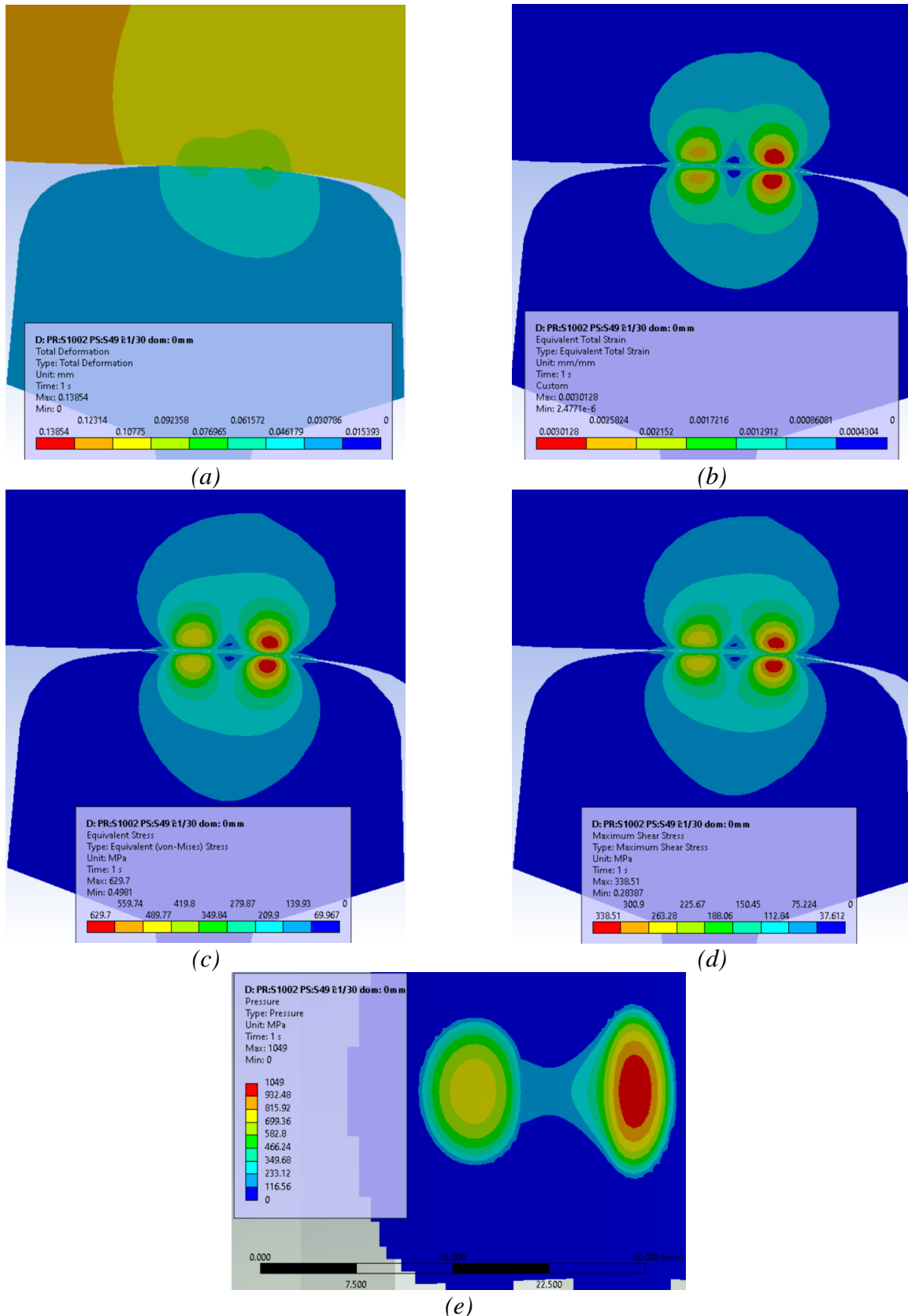


figura 4.5 Rezultatele obținute pentru o roată cu profil S1002 și șină S49 înclinată la 1/30 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm: (a) deformații totale; (b) starea de deformații specifice totale; (c) starea de tensiuni von-Mises; (d) starea de tensiuni tangențiale maxime; (e) distribuția de presiuni

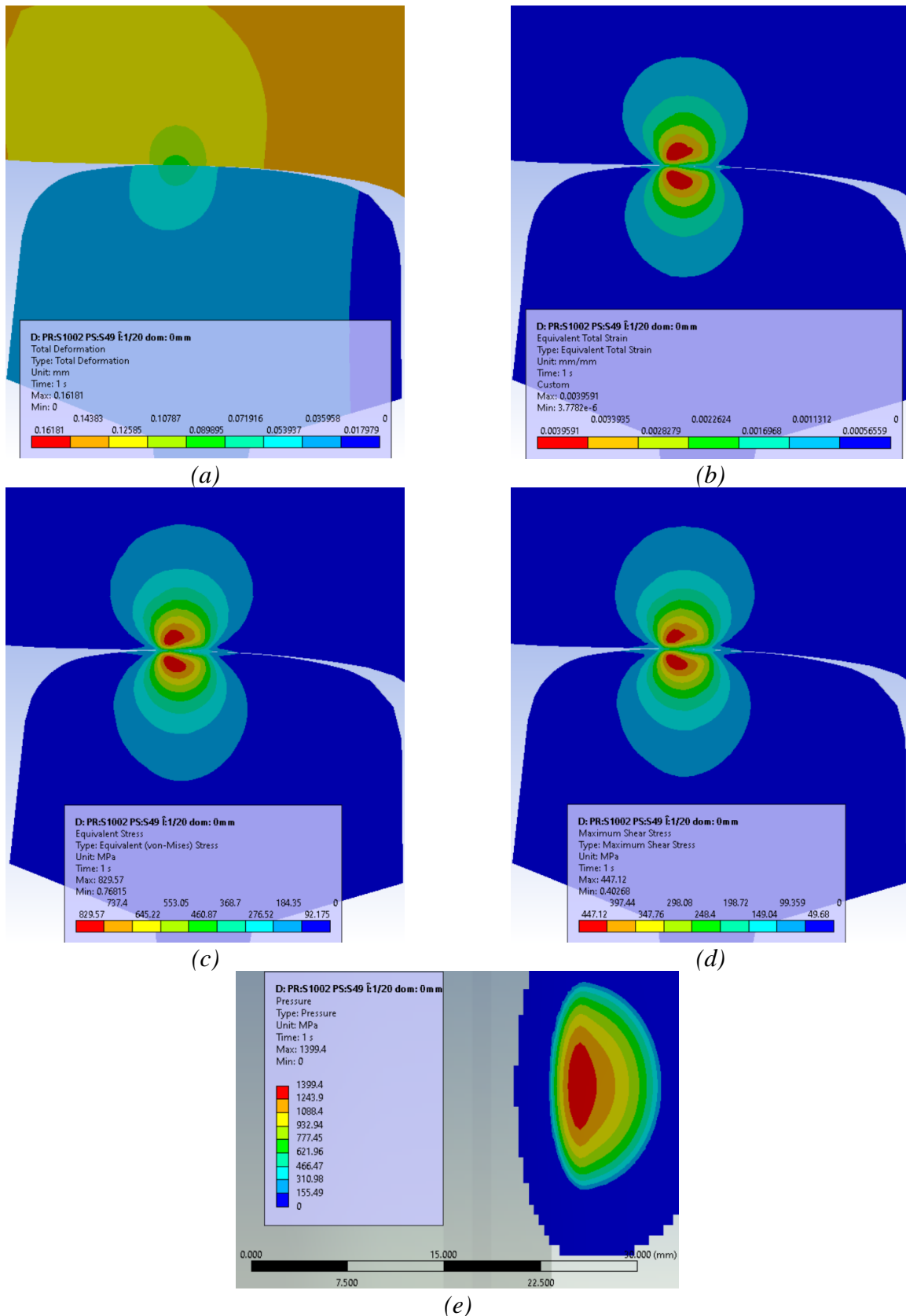


figura 4.6 Rezultatele obținute pentru o roată cu profil S1002 și șină S49 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm: (a) deformații totale; (b) starea de deformații specifice totale; (c) starea de tensiuni von-Mises; (d) starea de tensiuni tangențiale maxime; (e) distribuția de presiuni

4.2.3. INFLUENȚA PARAMETRILOR GEOMETRICI ASUPRA STĂRII DE TENSIUNI ȘI DEFORMAȚII

4.2.4. Descrierea problemei

Acest studiu își propune să investigheze numeric impactul profilului ciupercii șinelor folosite în România asupra deformațiilor, deformațiilor specifice, stării de tensiune, distribuției de presiune, ariei și formei de contact la interacțiunea roată-șină. În România, profilul roții este, în general, S78, iar șinele sunt de tip R65, UIC60 și S49, cu o înclinare de 1/20. În plus, rezultatele pentru o șină de tip S49 cu profil uzat sunt incluse datorită uzurii acestora. Sunt comparate rezultatele privind starea de tensiune, deformațiile specifice, distribuția de presiune, locația, aria și forma de contact.

4.2.5. Modelul AEF

Folosind modelul AEF descris în subpunctul 4.2 au fost obținute valorile pentru următoarele scenarii de interacțiune:

- Roată cu profil S78 – șină tip R65, UIC60, S49 și S49 uzat pentru un model 3D, înclinarea șinei de 1/20, conform modelului elastic, frecarea egală cu 0. Au rezultat imagini pentru valori ale deplasării laterale a osiei montate de 3, 0, și -5 mm, ale deformațiilor totale, starea de deformații specifice totale, starea de tensiuni von-Mises și tensiuni tangențiale maxime conform criteriului Tresca.

4.2.6. Rezultate obținute:

În figura 4.7 se prezintă valorile ariei de contact pentru o roată cu profil S78 și șine de tip R65, UIC60, S49 și S49-uzat funcție de deplasarea laterală a osiei montate. Aceste valori variază funcție de profilul șinei și deplasarea laterală a osiei montate. Din figură se pot observa valori mai mari ale ariei de contact pentru șina de tip S49, cele mai mici sunt pentru șina de tip UIC60. Comparativ cu profilul uzat, șina de tip S49 nouă, oferă în exploatare o arie de contact mai mare.

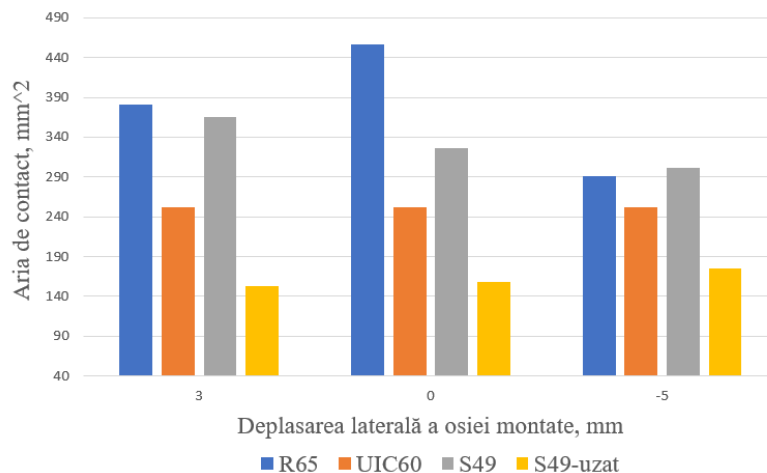


figura 4.7 Comparării ariei de contact pentru o roată cu profil S78 și șine de tip R65, UIC60, S49 și S49-Uzat funcție de deplasarea laterală a osiei montate

În comparație cu scenariile când șina este înclinată, aria de contact nu mai este în strânsă legătură cu starea de tensiuni și distribuția de presiuni, din cauza elementelor geometrice care oferă, în anumite puncte, o creștere considerabilă a presiunii, iar presiunea modifică maximul tensiunii. În figura 4.8 se prezintă tensiunea maximă echivalentă (von-Mises) pentru o roată cu profil S78 și șine de tip R65, UIC60, S49 și S49-uzat funcție de deplasarea laterală a osiei montate. Tensiunea maximă funcție de tipul șinei este calculată pentru deplasarea laterală a osiei montate la -5 mm, valorile maxime fiind de: 703,38 MPa, 746,13 MPa, 649,72 MPa și 1119,1 MPa pentru șina de tip R65, UIC60, S49 respectiv S49-uzat.

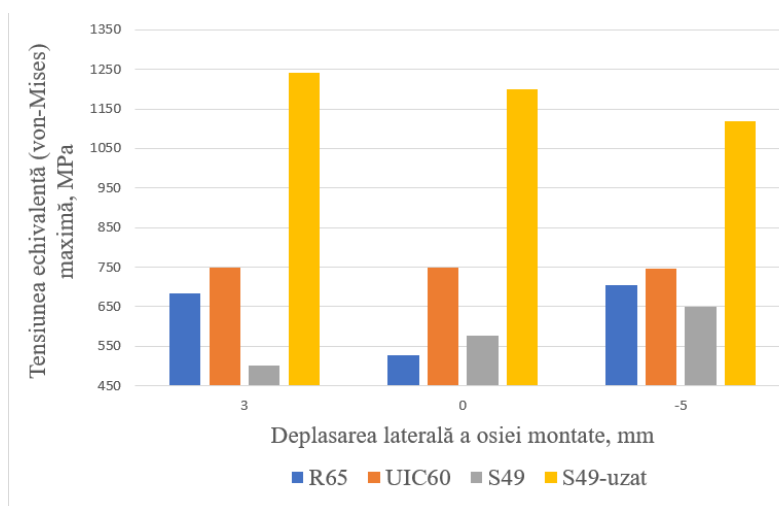


figura 4.8 Comparații privind tensiunea echivalentă (von-Mises) maximă pentru o roată cu profil S78 și șine de tip R65, UIC60, S49 și S49-Uzat funcție de deplasarea laterală a osiei montate

O comparație între presiunea maximă pentru tipul de șină R65, UIC60, S49 și S49-uzat funcție de deplasarea osiei montate este prezentată în figura 4.9. Din figură se pot observa presiuni relativ mai mici pentru șina de tip S49, presiuni mai mari pentru șina de tip UIC60. Șina de tip S49 nouă oferă în exploatare o presiune mai mică comparativ cu aceeași șină având însă profilul uzat.

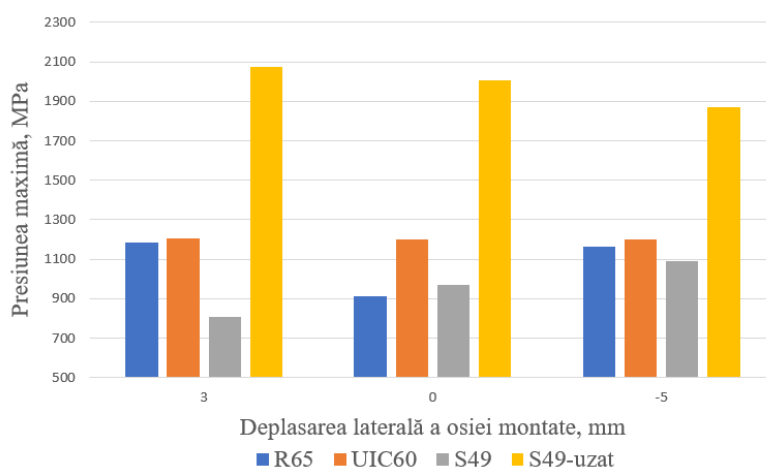


figura 4.9 Comparație între presiunea maximă pentru o roată cu profil S78 și șine de tip R65, UIC60, S49 și S49-Uzat funcție de deplasarea laterală a osiei montate

Din rezultatele obținute, se observă că valorile mai mici ale tensiunilor și presiunilor sunt înregistrate pentru scenariul în care șina este de tip S49. De asemenea, se remarcă că, pentru o înclinare a șinei de 1/20, interacțiunea favorabilă este cu roțile de profil S78, în timp ce pentru o înclinare de 1/40, interacțiunea favorabilă este cu roțile de profil S1002.

Deplasarea laterală a osiei montate și profilul ciupercii șinei influențează locația punctului de contact. Locația, la rândul său, influențează tensiunile și presiunile de contact. Pentru deplasarea laterală a osiei la -5 mm se obțin cele mai mari valori ale tensiunii și presiunii de contact.

Creșterea valorii relative a maximului tensiunii echivalente, creșterea deformațiilor specifice totale și apropierea de suprafața de contact a punctului de maxim influențează negativ durabilitatea la oboseala de contact a roții și a șinei, care funcționează sub o solicitare de contact cu rostogolire.

În figurile de mai jos se prezintă o serie de rezultate obținute pentru șina cu profil R65, UIC60, S49 și S49-uzat.

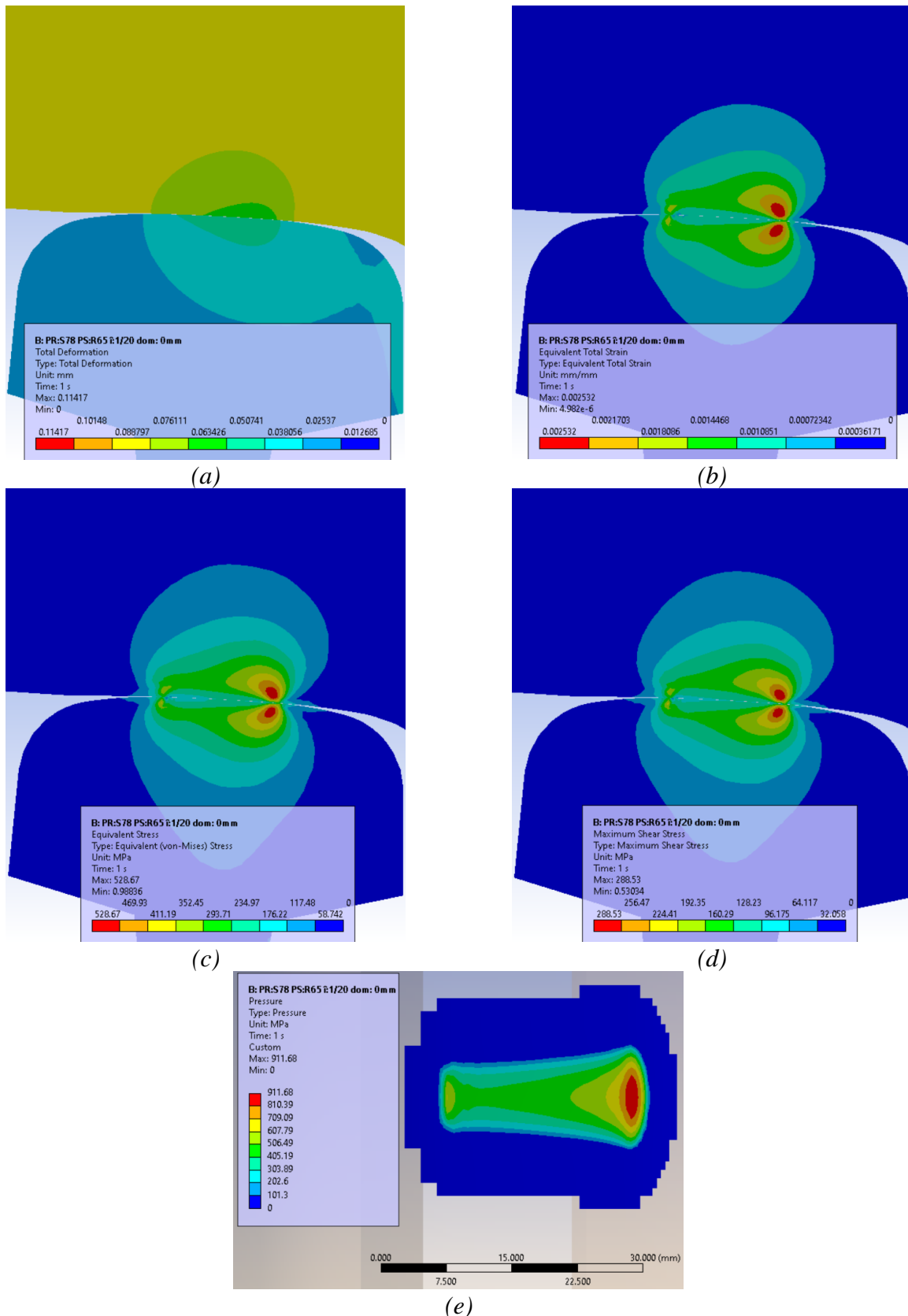


figura 4.10 Rezultatele obținute pentru o roată cu profil S78 și șină R65 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm: (a) deformații totale; (b) starea de deformații specifice totale; (c) starea de tensiuni von-Mises; (d) starea de tensiuni tangențiale maxime; (e) distribuția de presiuni

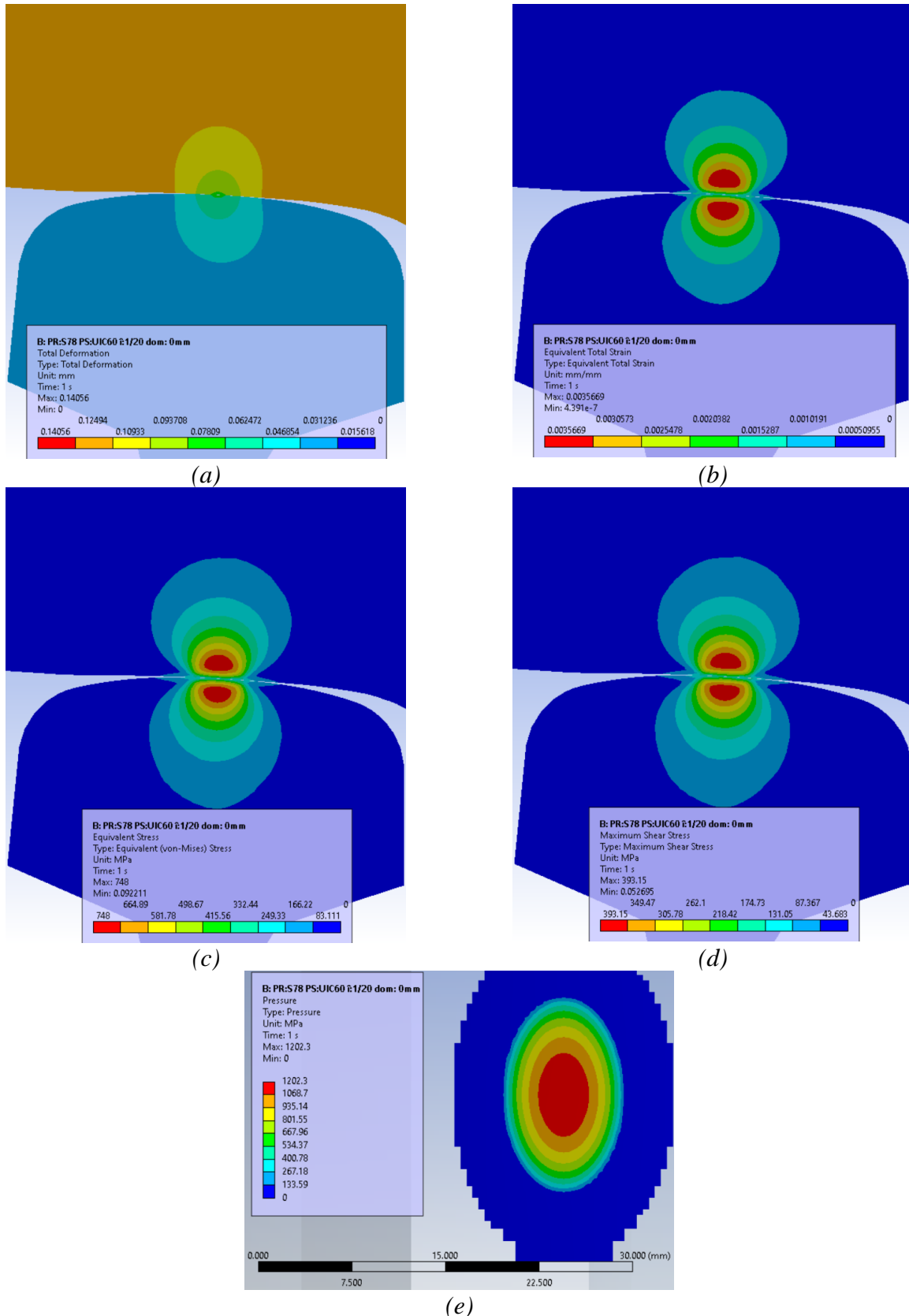


figura 4.11 Rezultatele obținute pentru o roată cu profil S78 și șină UIC60 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm: (a) deformații totale; (b) starea de deformații specifice totale; (c) starea de tensiuni von-Mises; (d) starea de tensiuni tangențiale maxime; (e) distribuția de presiuni

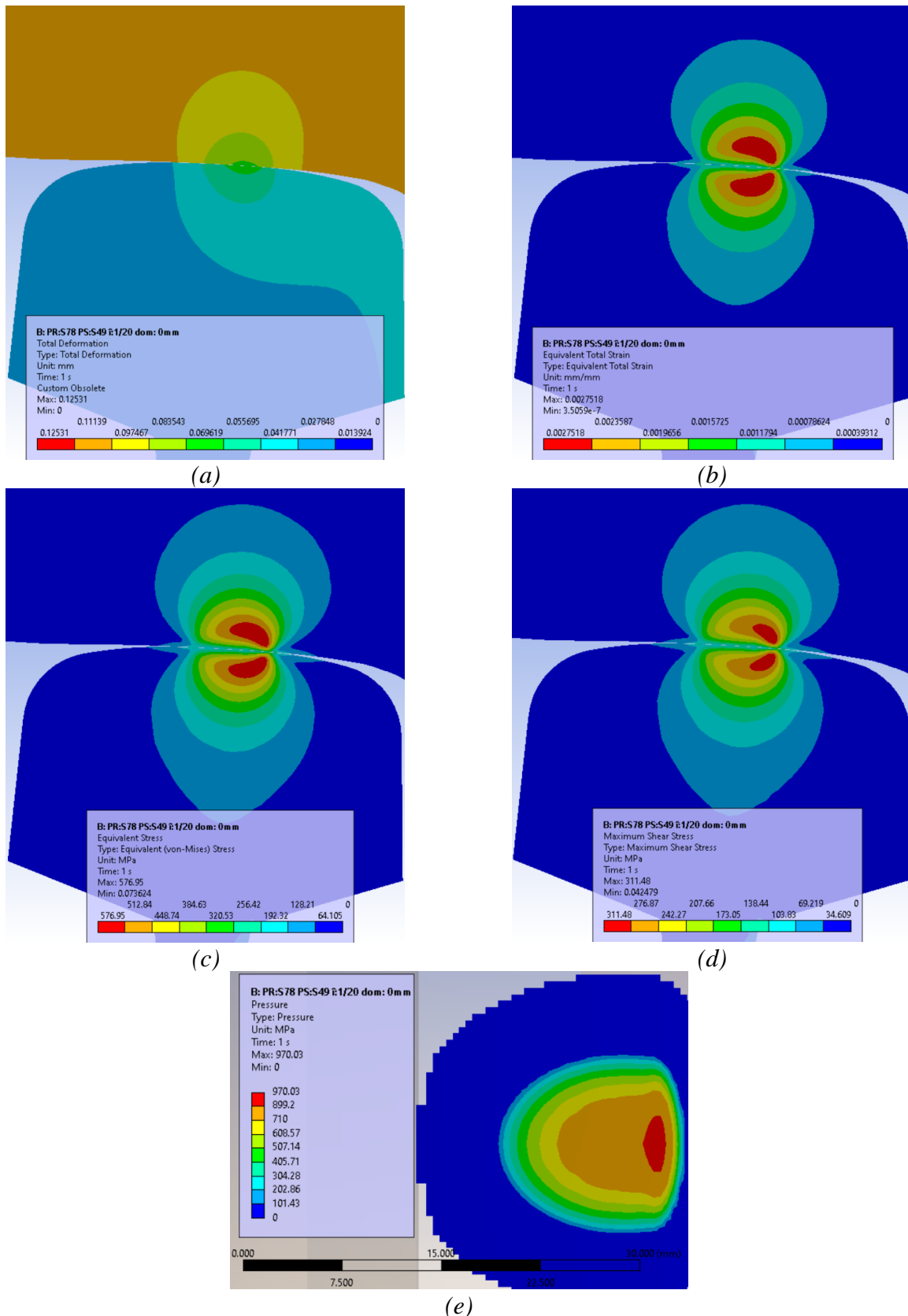


figura 4.12 Rezultatele obținute pentru o roată cu profil S78 și șină R65 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm: (a) deformații totale; (b) starea de deformații specifice totale; (c) starea de tensiuni von-Mises; (d) starea de tensiuni tangențiale maxime; (e) distribuția de presiuni

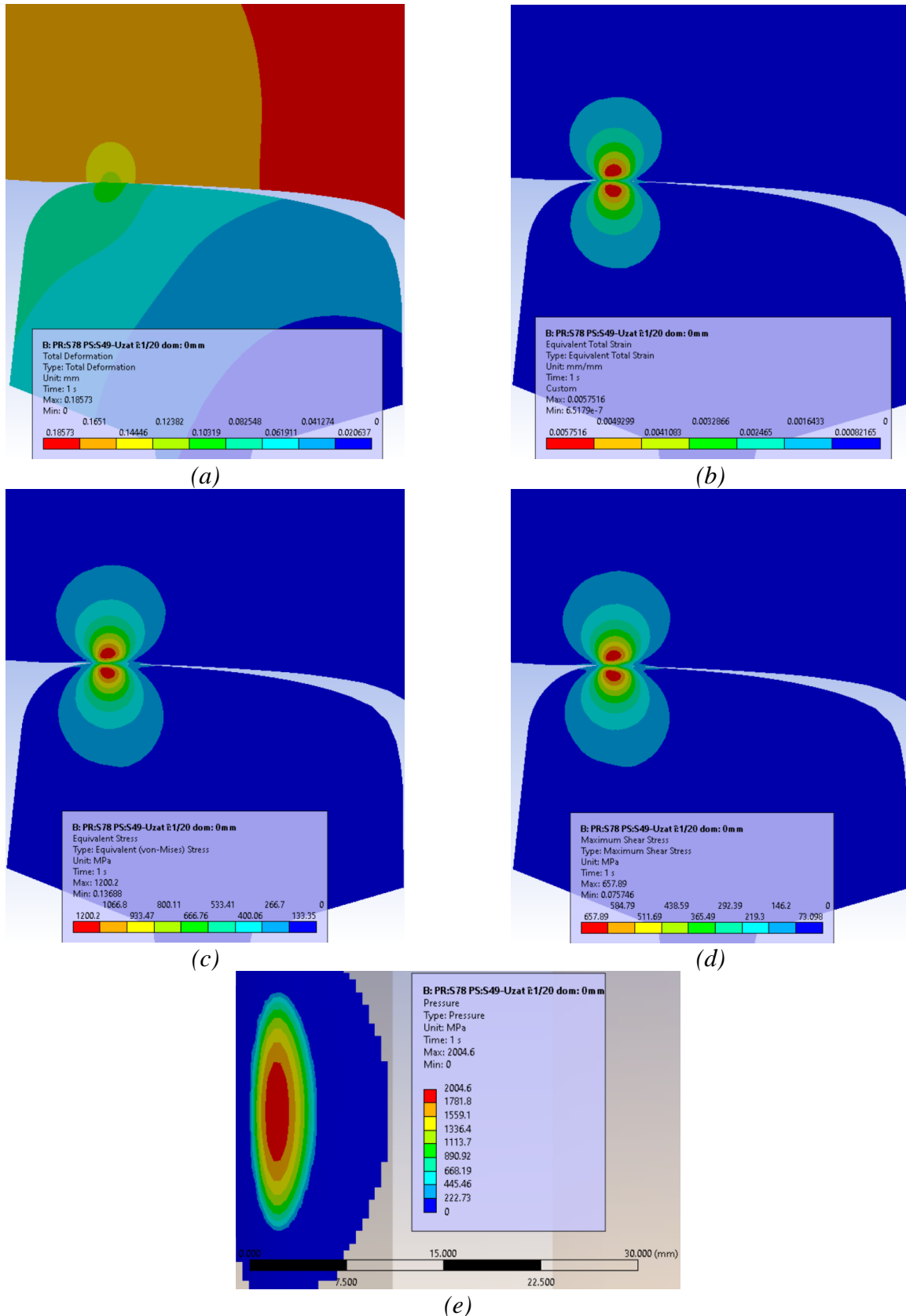


figura 4.13 Rezultatele obținute pentru o roată cu profil S78 și șină S49-Uzat înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm: (a) deformații totale; (b) starea de deformații specifice totale; (c) starea de tensiuni von-Mises; (d) starea de tensiuni tangențiale maxime; (e) distribuția de presiuni

4.3. STAREA DE TENSIUNI, DEFORMAȚII, DEFORMAȚII SPECIFICE CONFORM MODELULUI DE MATERIAL

4.3.1. Modelul AEF

Modelele de material, figura 4.14, utilizate în cadrul acestui studiu:

- modelul Hooke (elastic):
 - roată/șină: modulul Young: 200 GPa; coeficientul Poisson: 0,3;
- modelul Prandtl (elastic-perfect plastic):
 - roată/șină: modulul Young: 200 GPa; coeficientul Poisson: 0,3; limita de curgere: 540 MPa; modulul tangențial: 0 MPa;
- modelul elastic-plastic:
 - roată/șină: modulul Young: 200 GPa; coeficientul Poisson: 0,3; limita de curgere: 540 MPa; modulul tangențial: 4000 MPa;
- modelul Mroz (multiliniar):
 - roată/șină: modulul Young: 200 GPa; coeficientul Poisson: 0,3; limita de curgere: 540 MPa; proprietățile tangente: deformarea plastică 0 % la o tensiune de 540 MPa, deformarea plastică 1 % la o tensiune de 690 MPa, deformarea plastică 2 % la o tensiune de 730 MPa, deformarea plastică 4 % la o tensiune de 780 MPa, deformarea plastică 10 % la o tensiune de 850 MPa, deformarea plastică 20 % la o tensiune de 950 MPa.

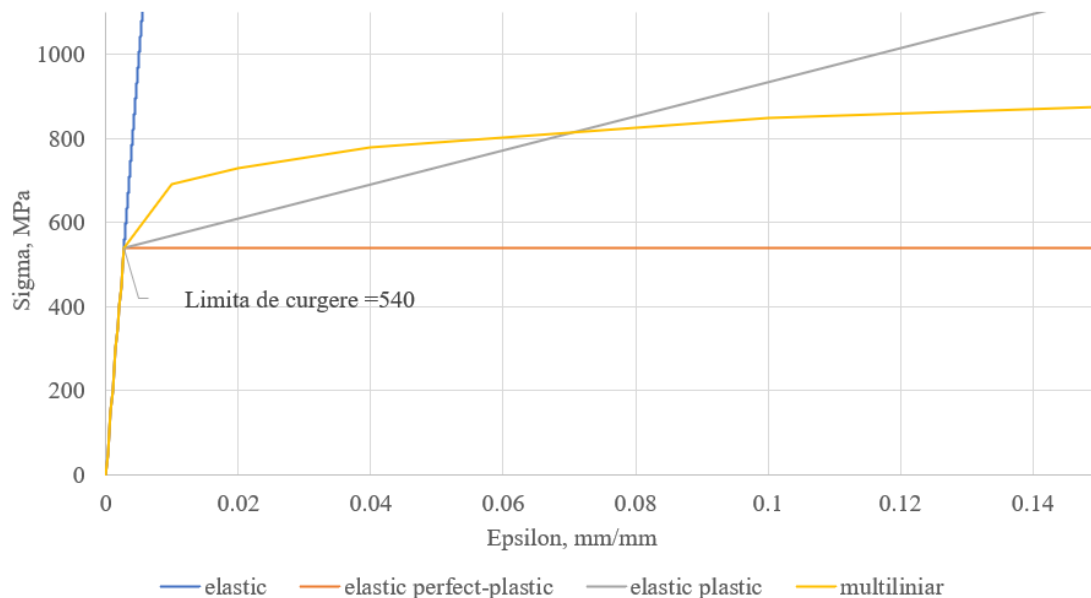


figura 4.14 Modelele de material adoptate pentru șină și roată

Au fost create modele AEF care conțin următoarele date de intrare: modelul de material descris mai sus; sarcina pe roată 90 kN; roată cu diametrul de 920 mm și profilul roții S78; șina de tip S49, înclinată la 1/20 rad.; ecartamentul căii de 1435 mm; distanța dintre fețele interioare ale celor

două roți de 1360 mm; deplasarea laterală a osiei montate: 3; 0 și -5 mm; unghiul de atac: 0°; coeficientul de frecare $\mu=0$.

4.3.2. Rezultate obținute

Tensiunea maximă pentru deplasarea la 3 mm nu a depășit limita de curgere impusă și astfel au rezultat aceleași rezultate pentru toate modelele de material adoptate. Tensiunea maximă a fost obținută la deplasarea osiei montate la -5 mm având valoarea de 628,24 MPa pentru modelul elastic, 538,95 MPa pentru modelul elastic perfect-plastic, 542,27 MPa pentru modelul elastic-plastic, și de 549,97 MPa pentru modelul multiliniar.

Locația maximului tensiunii este diferită în funcție de deplasarea laterală a osiei montate pentru deplasarea la: 3 mm, maximul este situat la o adâncime de 3,6 mm; 0 mm, la 2,34 mm; -5 mm, la 2,24 mm.

Deformațiile plastice se dezvoltă pentru o deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm și -5 mm, maximele fiind pentru deplasarea la -5 mm. După cum era de așteptat, la modelul de material elastic-perfect plastic au rezultat și cele mai mari deformații specifice.

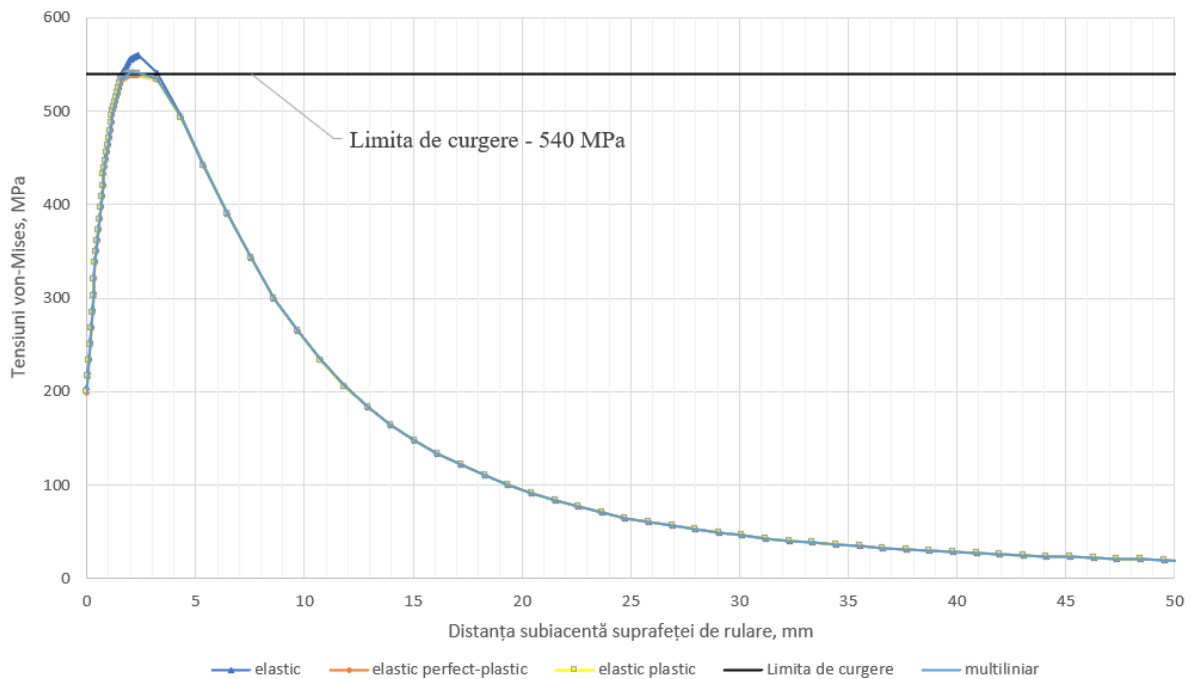


figura 4.15 Comparații privind tensiuni von-Mises subiacent suprafeței de rulare pe o distanță de 50 mm, conform modelelor de material adoptat pentru o șină de tip S49, o roată cu profil S78 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

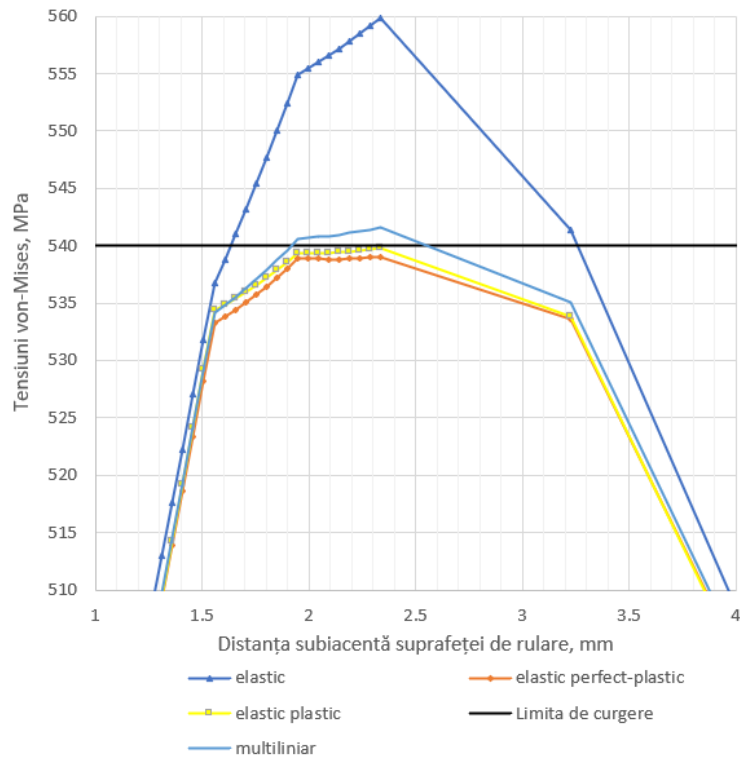


figura 4.16 Comparații privind tensiuni von-Mises subiacent suprafeței de rulare pe distanța de 1-4 mm, conform modelelor de material adoptat pentru o șină de tip S49, o roată cu profil S78 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

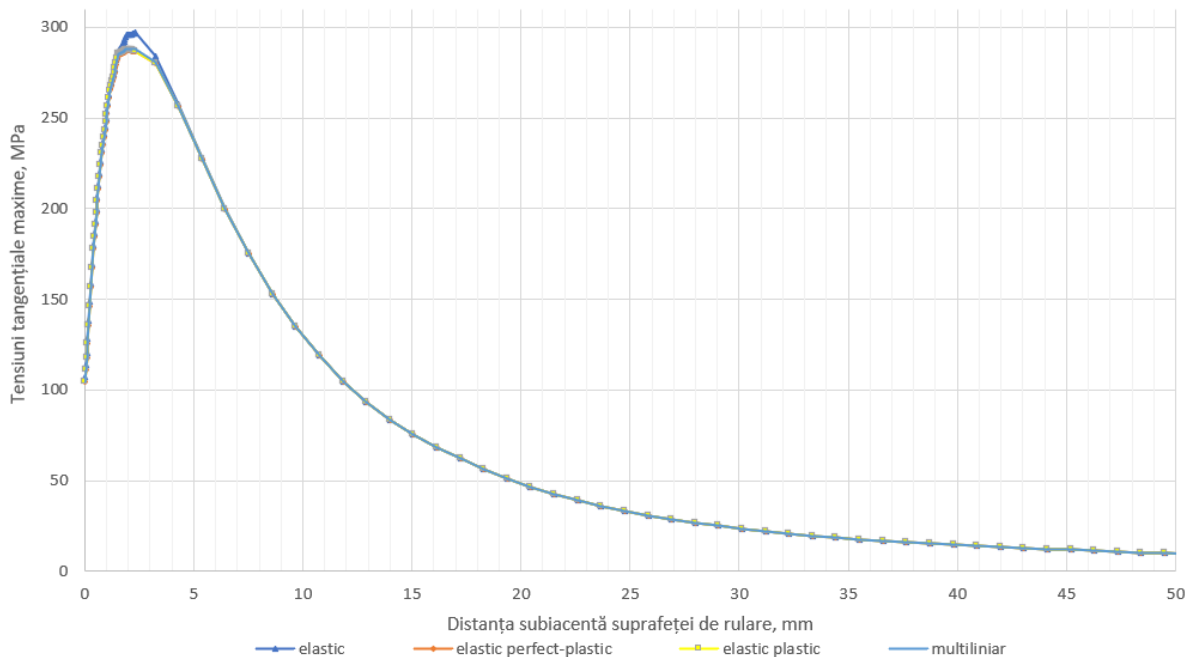


figura 4.17 Comparații privind tensiuni tangențiale maxime subiacent suprafeței de rulare pe o distanță de 50 mm, conform modelelor de material adoptat pentru o șină de tip S49, o roată cu profil S78 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

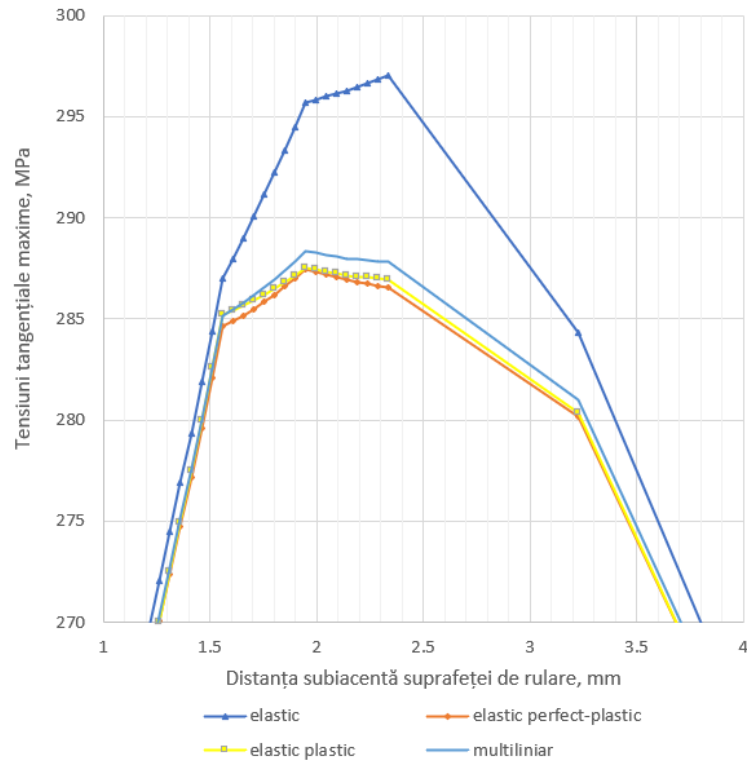


figura 4.18 Comparații privind tensiuni tangențiale maxime subiacent suprafeței de rulare pe o distanță de 1-4 mm, conform modelelor de material adoptat pentru o șină de tip S49, o roată cu profil S78 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

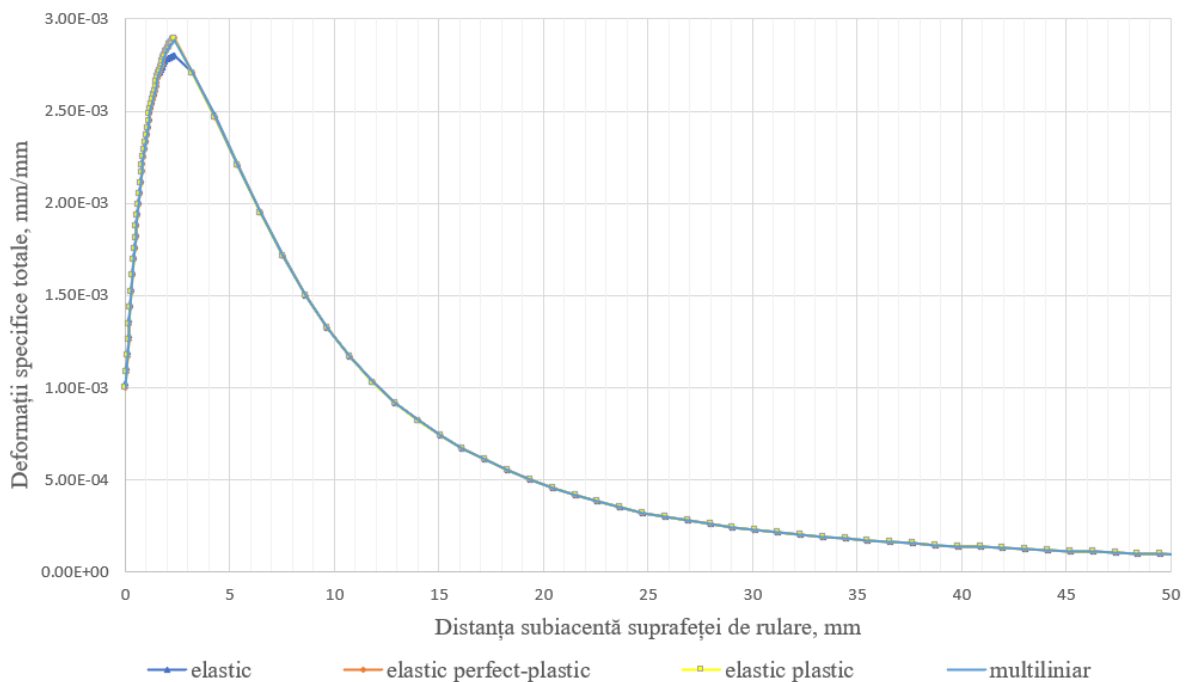


figura 4.19 Comparații privind deformații specifice totale subiacent suprafeței de rulare pe o distanță de 50 mm, conform modelelor de material adoptat pentru o șină de tip S49, o roată cu profil S78 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

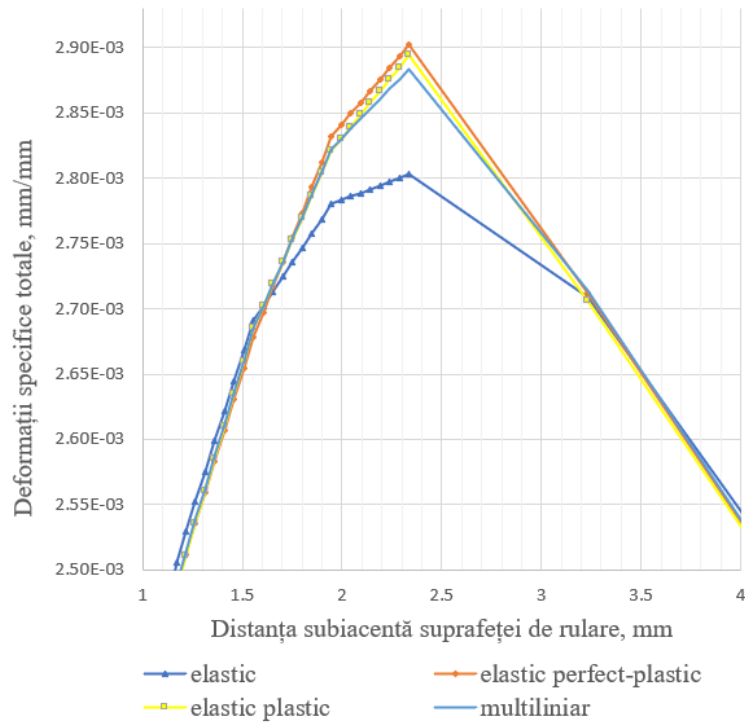


figura 4.20 Comparații privind deformații specifice totale subiacent suprafeței de rulare pe distanța de 1-4 mm, conform modelelor de material adoptat pentru o șină de tip S49, o roată cu profil S78 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

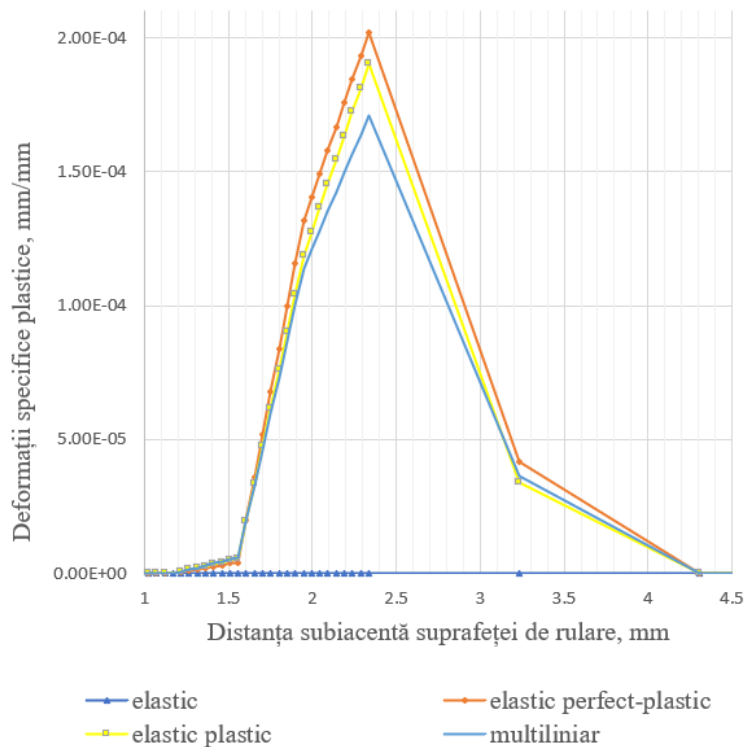


figura 4.21 Comparații privind deformații specifice plastice acumulate subiacent suprafeței de rulare pe distanța de 1-4,5 mm, conform modelelor de material adoptat pentru o șină de tip S49, o roată cu profil S78 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

4.4. INFLUENȚA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE MATERIALULUI ASUPRA STĂRII DE TENSIUNI, DEFORMAȚII, DEFORMAȚII SPECIFICE ȘI GRADIENTULUI DE PRESIUNI

4.4.1. Descrierea problemei

Acest studiu își propune să investigheze influența proprietăților mecanice ale materialului din care sunt fabricate șinele și roțile de cale ferată asupra deformațiilor, deformațiilor specifice, stării de tensiune, distribuției de presiune, mărimea și forma ariei de contact la interacțiunea roată-șină. Datele de intrare includ rezultatele obținute din încercările la tracțiune și evaluarea prin ultrasunete prezentate în subpunctele 3.2.1, 3.2.2 și 3.10.1.

4.4.2. Rezultate obținute:

Rezultatele obținute pentru interacțiunea dintre o roată cu profil S78 și șina de tip S49 înclinată la 1/20 cu proprietățile de material pentru: șină „85” și „bandaj”; șină „86” și „bandaj”; șină „NOUĂ” și „bandaj”; șină „UIC60” și „bandaj”.

Deformațiile plastice se observă numai în elementul la care materialul are o limită de curgere mai mică. În cazul în care materialul are o limită de curgere mai mare atunci în elementul din care este fabricată componenta nu se va deforma plastic sau se va deforma mult mai puțin.

În figurile de mai jos sunt prezentate o serie de rezultate.

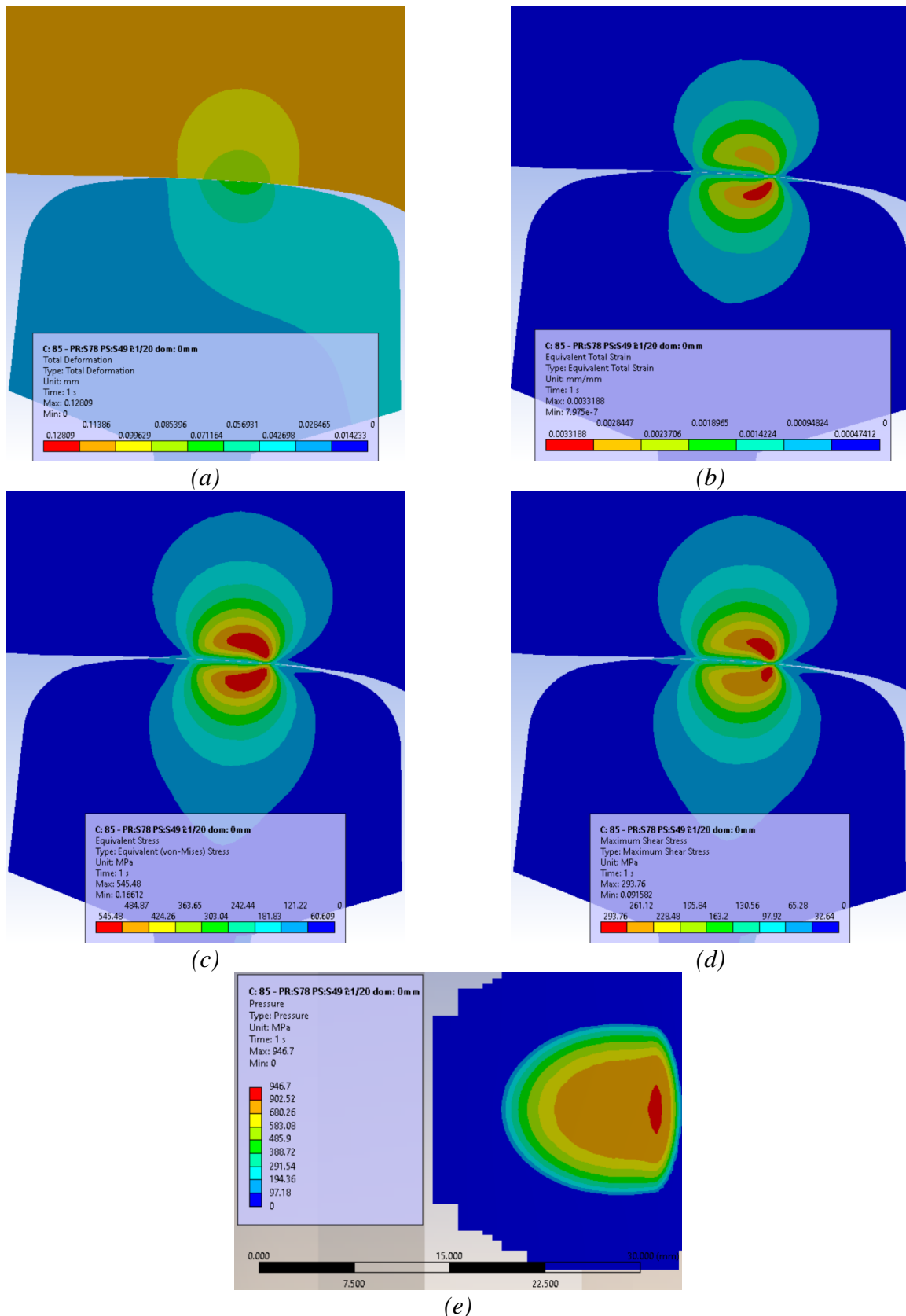


figura 4.22 Rezultatele obținute pentru o roată cu profil S78 și șină S49 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm conform proprietăților mecanice impuse a șinei „85” și „bandaj”: (a) deformații totale; (b) starea de deformații specifice totale; (c) starea de tensiuni von-Mises; (d) starea de tensiuni tangențiale maxime; (e) distribuția de presiuni

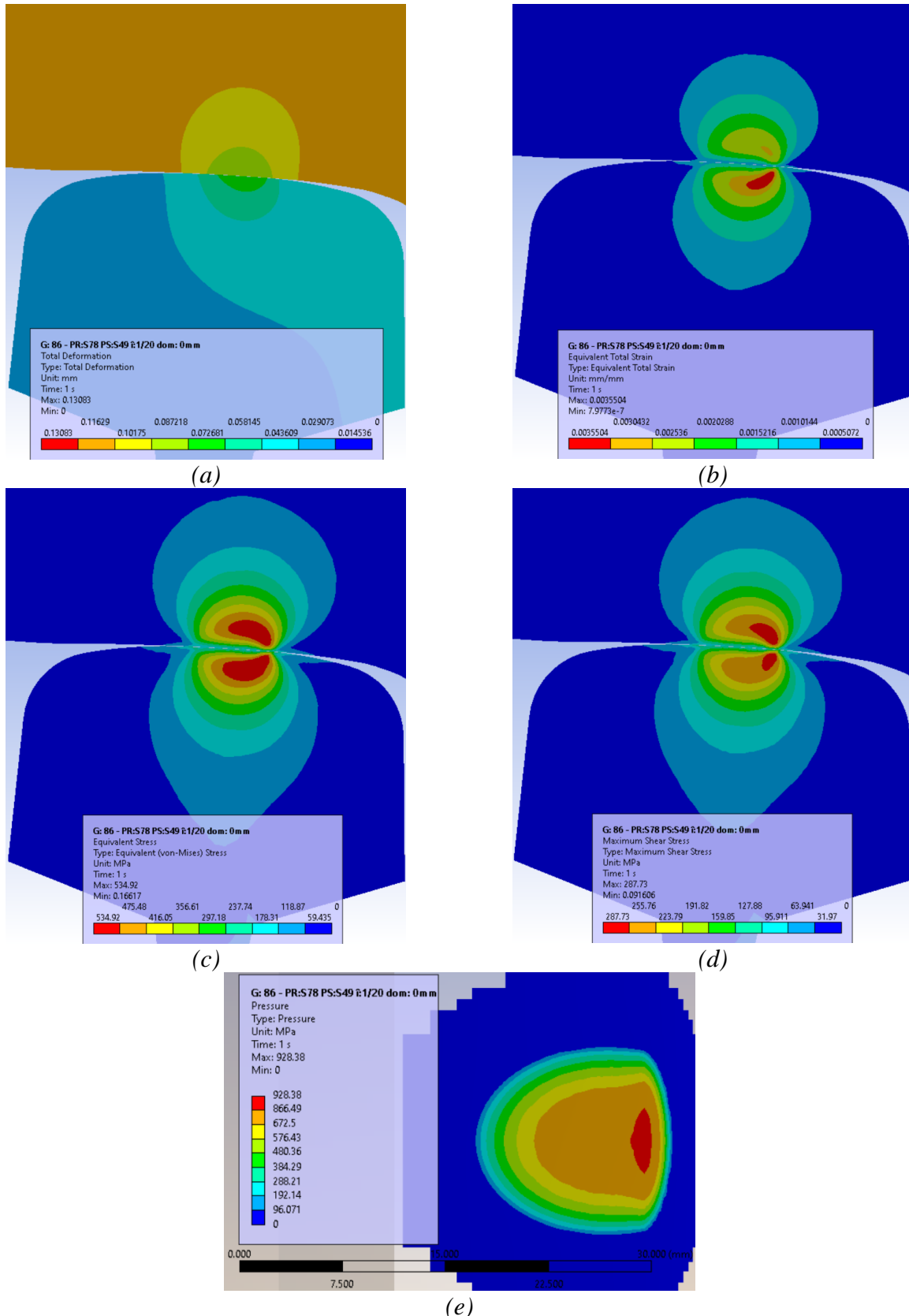


figura 4.23 Rezultatele obținute pentru o roată cu profil S78 și șină S49 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm conform proprietăților mecanice impuse a șinei „86” și „bandaj”: (a) deformații totale; (b) starea de deformații specifice totale; (c) starea de tensiuni von-Mises; (d) starea de tensiuni tangențiale maxime; (e) distribuția de presiuni

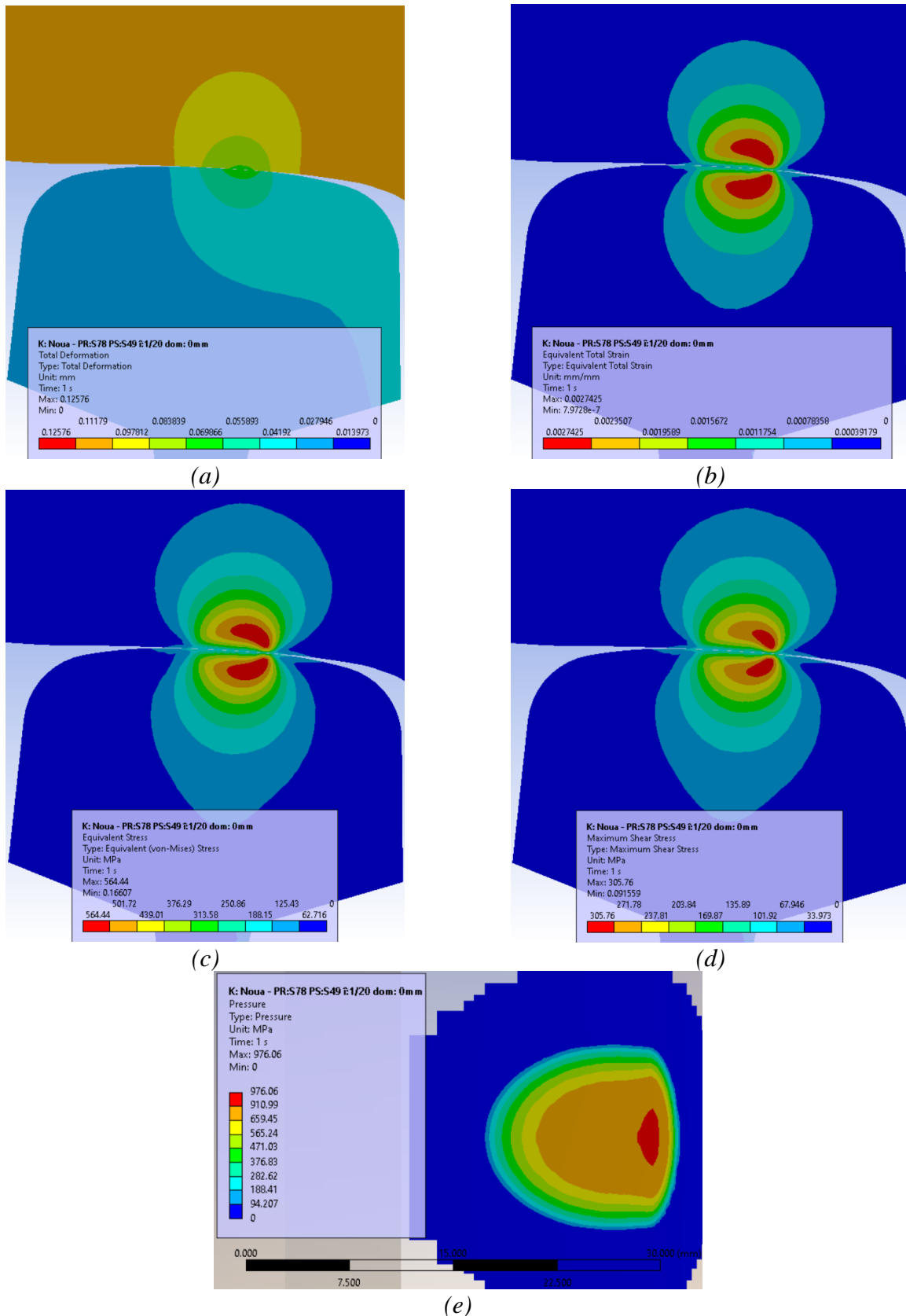


figura 4.24 Rezultatele obținute pentru o roată cu profil S78 și șină S49 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm conform proprietăților mecanice impuse a șinei „NOUĂ” și „bandaj”: (a) deformații totale; (b) starea de deformații specifice totale; (c) starea de tensiuni von-Mises; (d) starea de tensiuni tangențiale maxime; (e) distribuția de presiuni

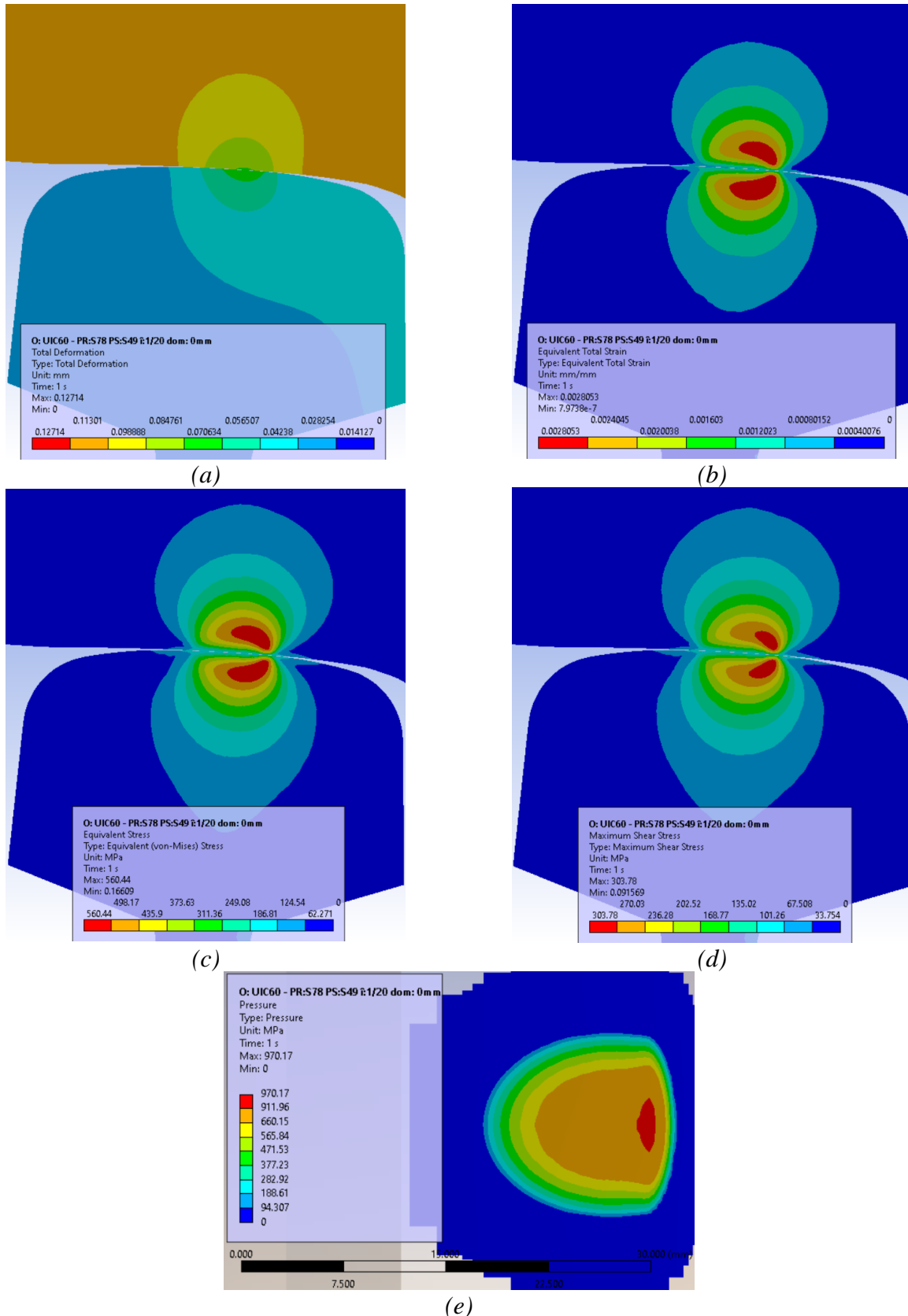


figura 4.25 Rezultatele obținute pentru o roată cu profil S78 și șină S49 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm conform proprietăților mecanice impuse a șinei „UIC60” și „bandaj”: (a) deformații totale; (b) starea de deformații specifice totale; (c) starea de tensiuni von-Mises; (d) starea de tensiuni tangențiale maxime; (e) distribuția de presiuni

4.5. INFLUENȚA NEOMOGENITĂȚILOR DE MATERIAL A BANDAJULUI ROȚII ASUPRA STĂRII DE TENSIUNI ȘI DEFORMAȚII SPECIFICE

4.5.1. Descrierea problemei

În urma testelor de duritate din cadrul subpunctului 3.7.2, a fost determinată duritatea în secțiunea transversală a bandajului subiacent suprafeței de rulare, din care s-a observat faptul că duritatea variază cu până la 30% pe o distanță de 15 mm față de materialul de bază, figura 3.20. Au fost investigate numeric două scenarii de interacțiune roată-șină: în prima s-au luat în considerare proprietățile neomogene ale materialului roții iar în a doua au fost adoptate proprietățile omogene.

4.5.2. Rezultatele obținute

Rezultatele comparative obținute pentru scenariul în care sunt impuse proprietățile neomogene ale materialului roții față de scenariul când materialul este considerat omogen sunt prezentate după cum urmează:

- în figura 4.26 este prezentată starea de tensiuni echivalente (von-Mises);
- în figura 4.27 este prezentată starea de tensiuni tangențiale maxime;
- în figura 4.28, figura 4.30 și figura 4.31 este prezentată starea de deformații specifice totale;
- în figura 4.29 este prezentată starea de deformații specifice plastice;

Din rezultatele obținute se observă o creștere a tensiunii echivalente cu 13 MPa, maximum estefiind obținut pentru modelul neomogen. De oarece limita de curgere a materialului impus roții pentru modelul neomogen este mai mare comparativ cu cel al șinei, se deformează plastic doar materialul șinei.

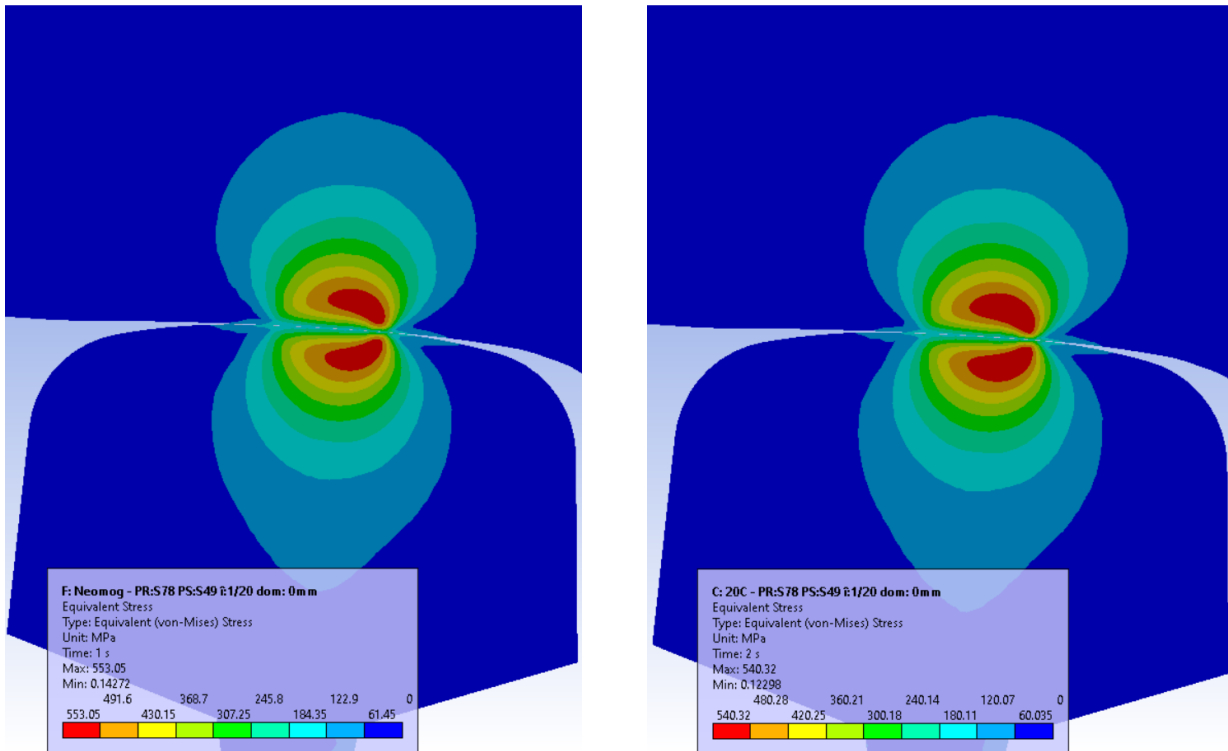


figura 4.26 Comparații privind starea de tensiuni echivalente (von-Mises), conform modelului de material neomogen (stânga) și omogen (dreapta) pentru interacțiunea roții cu profil S78, șină de tip S49 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

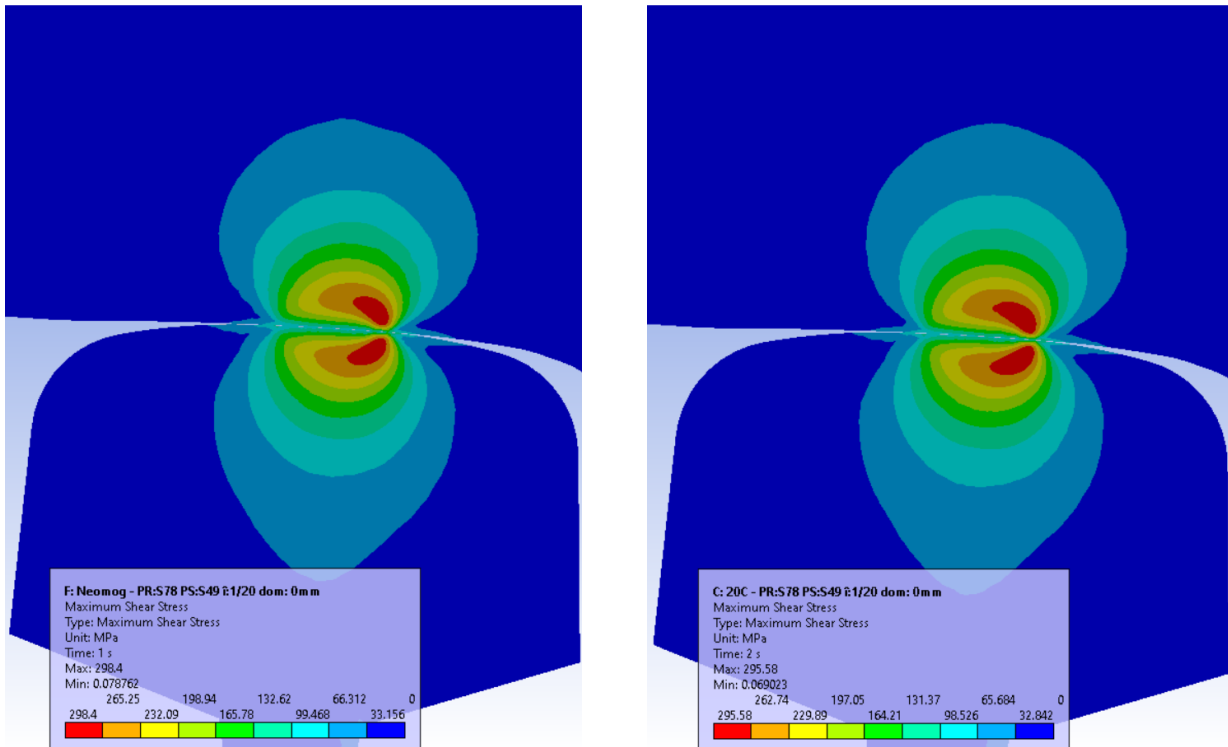


figura 4.27 Comparații privind starea de tensiuni tangențiale maxime, conform modelului de material neomogen (stânga) și omogen (dreapta) pentru interacțiunea roții cu profil S78, șină de tip S49 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

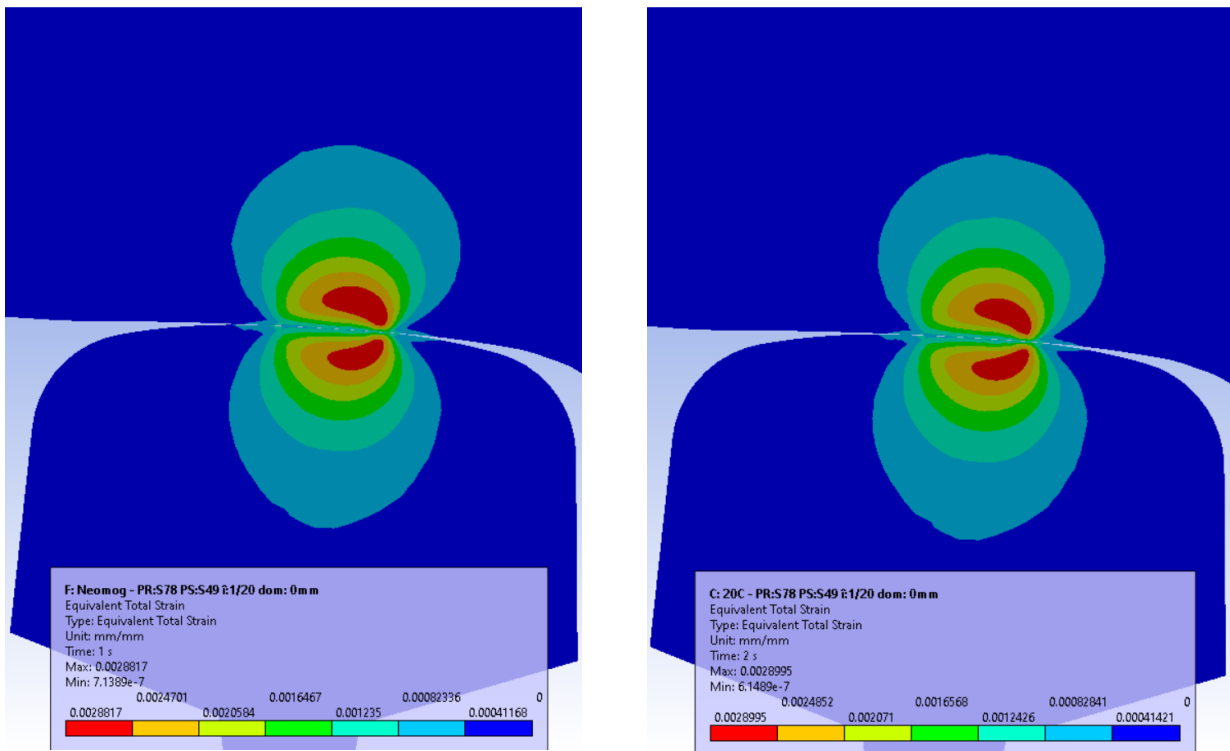


figura 4.28 Comparații privind starea de deformații specifice totale, conform modelului de material neomogen (stânga) și omogen (dreapta) pentru interacțiunea roții cu profil S78, șină de tip S49 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

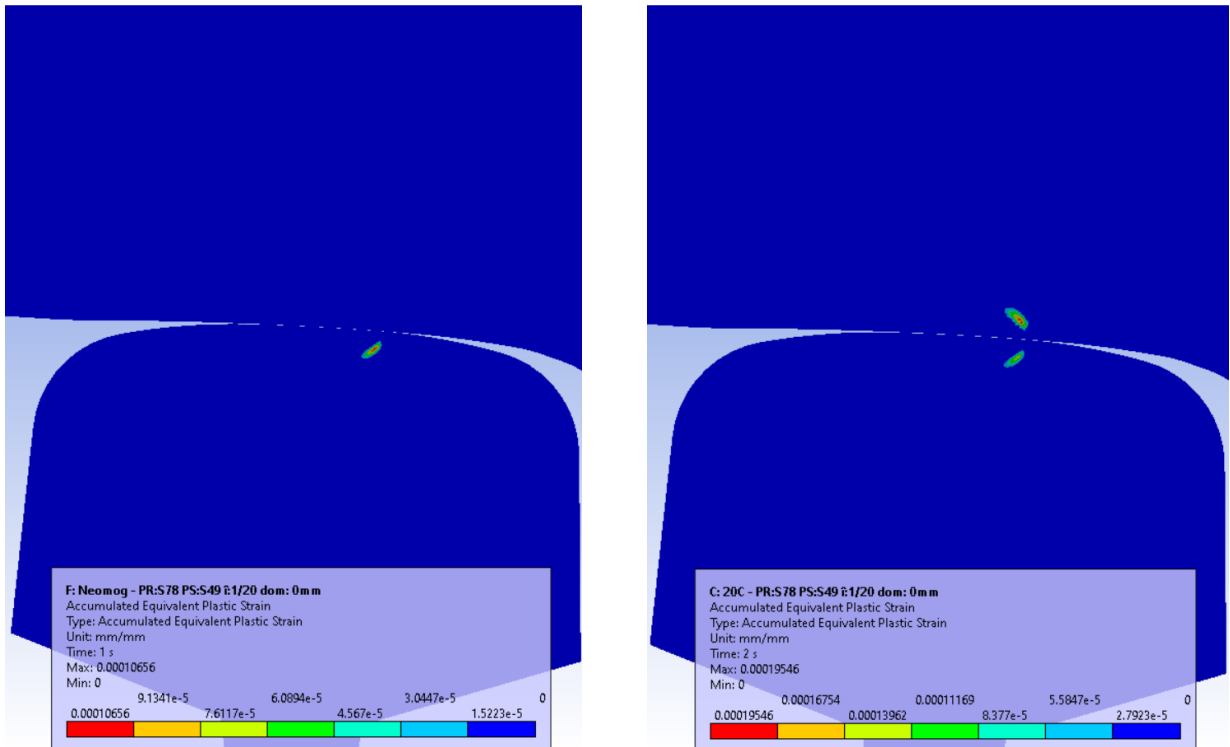


figura 4.29 Comparații privind starea de deformații specifice plastice, conform modelului de material neomogen (stânga) și omogen (dreapta) pentru interacțiunea roții cu profil S78, șină de tip S49 înclinată la 1/20 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

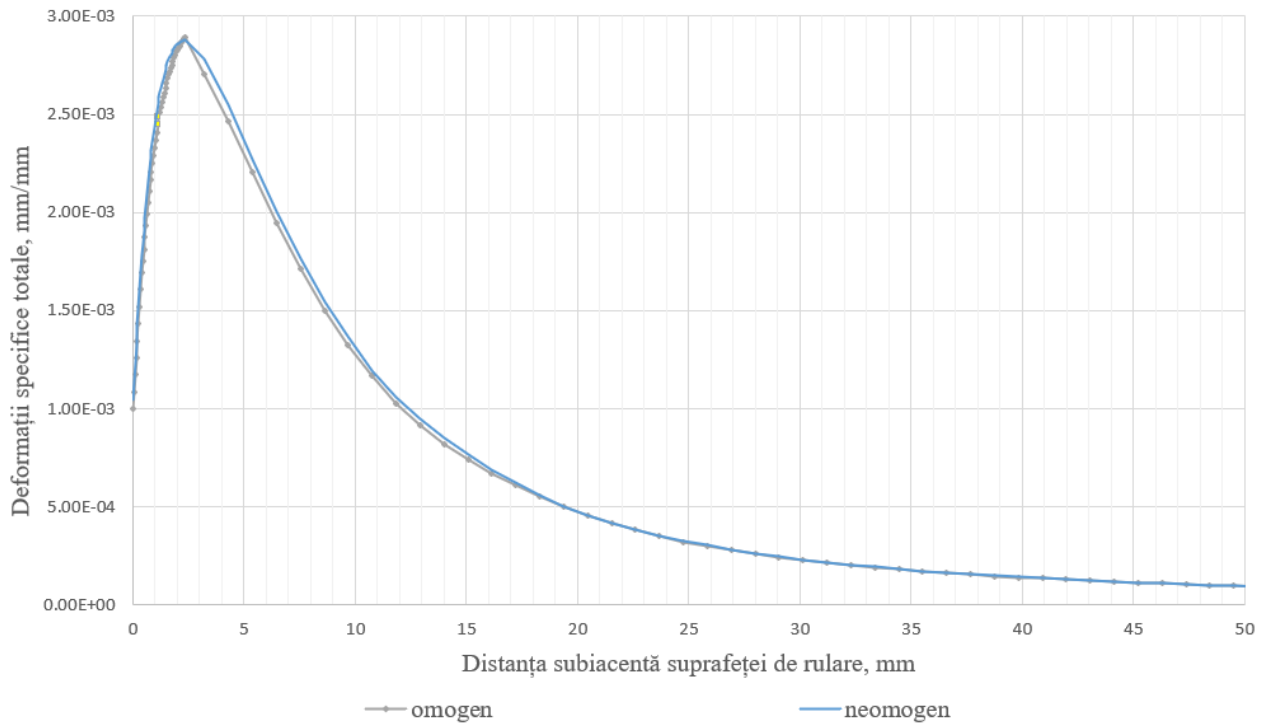


figura 4.30 Comparații privind starea de deformații specifice totale subiacent suprafeței de rulare pe o distanță de 50 mm, conform modelelor de material adoptat pentru o șină de tip S49, o roată cu profil S78 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

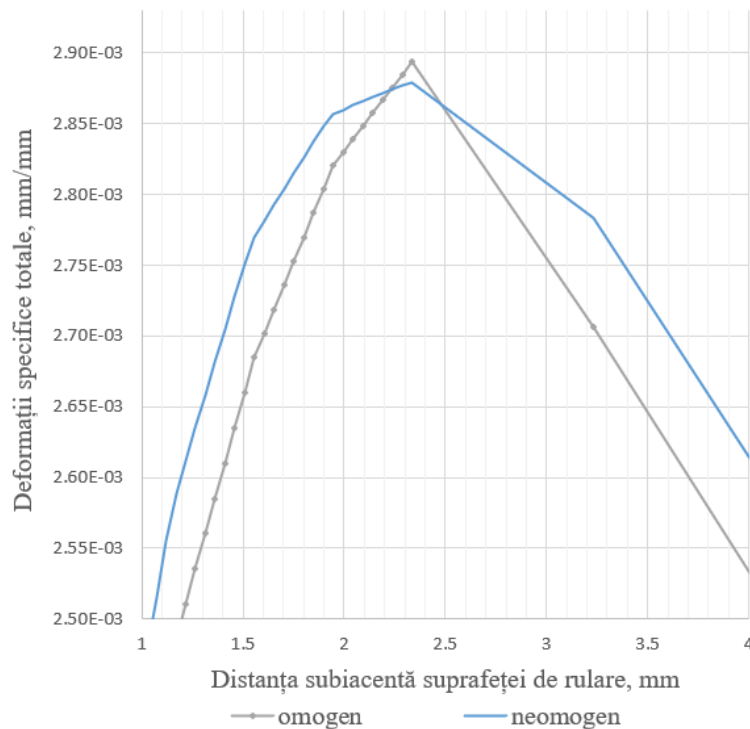


figura 4.31 Comparații privind starea de deformații specifice totale subiacent suprafeței de rulare pe o distanță de 1-4 mm, conform modelelor de material adoptat pentru o șină de tip S49, o roată cu profil S78 și deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

4.6. INFLUENȚA GRADIENTULUI DE TEMPERATURĂ CE APARE ÎN TIMPUL FAZEI DE FRÂNARE ASUPRA STĂRII DE TENSIUNI ȘI DEFORMAȚII SPECIFICE

4.6.1. Descrierea problemei

Din studiul de sinteză s-a constatat faptul că regimul de frânare afectează semnificativ durabilitatea șinei și roții de cale ferată. Scopul modelelor dezvoltate în cadrul acestui subpunct este de a analiza comportamentul termo-mecanic al contactului uscat dintre roata/șină. Gradientul de temperatură este generat din cauza interacțiunii roții cu saboții de frânare în timpul fazei de frânare. Modelarea distribuției de temperaturi pe volumul roții este modelat cu ajutorul modului termic tranzitoriu, modelul fiind adoptat conform lucrării (Бояркин, 2019) pentru modelul AEF utilizat în cadrul acestui subpunct. Rezultatele gradientului de temperatură sunt asemănătoare cu rezultatele obținute de (Бояркин, 2019). Rezultatele obținute pentru gradientul de temperatură sunt exportate pentru o analiza termo-structurală în modulul static-structural în vederea stabilirii deformațiilor specifice și tensiunilor Von Mises în roată.

4.6.2. Rezultate obținute

Gradientul de temperaturi generat în timpul fazei de frânare timp de 1200 secunde este prezentat în figura 4.32. Temperatura maximă calculată este 427 °C în zona de interacțiune a roții cu saboții de frânare. Temperatura scade cu distanța de la suprafața de frânare, de la temperatura maximă de 427 °C până la 31 °C în zona de cuplei butuc - osie montată.

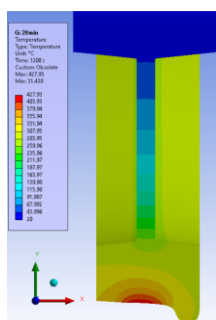


figura 4.32 Gradientul de temperaturi generat în roată în faza regimului de frânare

În figura 4.33 sunt prezentate rezultatele obținute pentru starea de deformații specifice totale în urma analizei termo-mecanice, pentru cazul când există interacțiune cu șina și fără interacțiune. Maximul deformației specifice totale obținute pentru interacțiunea cu șina este de până la 0,008 mm/mm și de 0,00066 mm/mm pentru cazul când această interacțiune nu există. Valorile deformațiilor specifice maxime sunt obținute în zona de interacțiune a roții cu saboții de frânare. În cazul interacțiunii cu șina, deformațiile specifice mari sunt obținute în zona alăturată contactului. În general, valorile obținute din zona alăturată contactului sunt în domeniul plastic pentru materialul din care este confecționată roata.

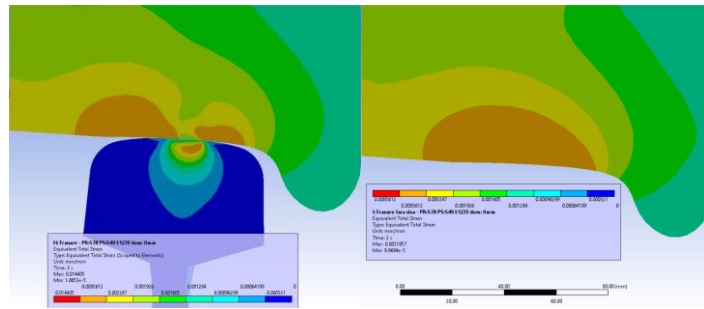


figura 4.33 Starea de deformații specifice totale la contactul roată-șină luând în considerare gradientul de temperatură și modificarea proprietăților de material funcție de temperatură pentru cazul când există interacțiunea cu șina (stânga) și fără interacțiune (dreapta)

În figura de mai jos sunt prezentate rezultatele pentru starea de deformații specifice elasto-plastice obținute în urma analizei termo-mecanice, atât pentru cazul când există interacțiune cu șina, cât și pentru cazul fără interacțiune. Maximul deformației specifice plastice pentru interacțiunea cu șina este de 0,0011 mm/mm, în timp ce pentru lipsa acestei interacțiuni este de 0,00094 mm/mm. Valorile maxime ale deformațiilor specifice sunt observate în zona de interacțiune a roții cu saboții de frânare. În cazul interacțiunii cu șina, deformațiile specifice cresc semnificativ în zona adiacentă punctului de contact.

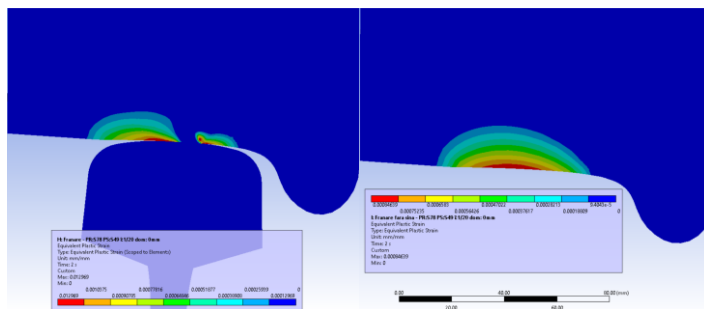


figura 4.34 Starea de deformații specifice elasto-plastice la contactul roată-șină luând în considerare gradientul de temperatură și modificarea proprietăților de material funcție de temperatură pentru cazul când există interacțiunea cu șina (stânga) și fără interacțiune (dreapta)

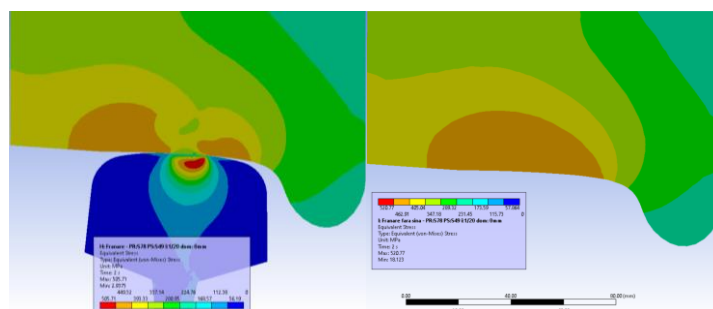


figura 4.35 Starea de tensiuni echivalente (von-Mises) la contactul roată-șină luând în considerare gradientul de temperatură și modificarea proprietăților de material funcție de temperatură pentru cazul când există interacțiunea cu șina (stânga) și fără interacțiune (dreapta)

În figura 4.35 sunt prezentate rezultatele analizei termo-mecanice pentru starea de tensiuni echivalente (von-Mises) pentru situația în care interacțiunea cu șina este luată în considerare, precum

și pentru situația în care nu avem această interacțiune. Maximul tensiunii von-Mises în șină este înregistrat în zona de contact, la o adâncime de aproximativ 2 mm. Valorile maxime ating 505 MPa în ambele cazuri, însă această valoare este mai mică cu aproximativ 70 MPa atunci când gradientul nu este considerat. Pentru roată, starea de tensiuni echivalente suferă modificări semnificative, prezentând valori ridicate pe un volum mai mare de material. Tensiuni de peste 300 MPa sunt observate chiar și la adâncimi de 50 mm de la suprafața de rulare. Maximul tensiunii, de 420 MPa, este înregistrat în materialul roții, fiind situat în zona de plasticitate a materialului, influențată de proprietățile mecanice în funcție de temperatură. În absența contactului cu șina, maximul tensiunii este de 430 MPa.

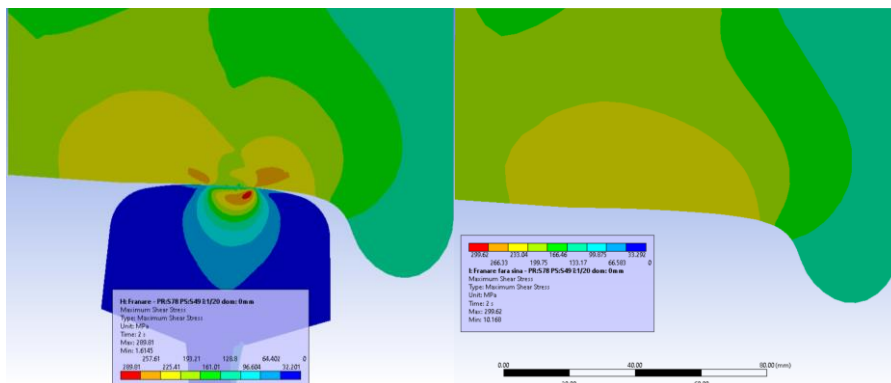


figura 4.36 Starea de tensiuni tangențiale maxime la contactul roată-șină luând în considerare gradientul de temperatură și modificarea proprietăților de material funcție de temperatură pentru cazul când există interacțiunea cu șina (stânga) și fără interacțiune (dreapta)

În figura 4.36 sunt prezentate rezultatele obținute pentru starea de tensiuni tangențiale maxime în urma analizei termo-mecanice, pentru cazul când există interacțiune cu șina și fără interacțiune. Maximul tensiunii tangențiale maxime în șină este obținut în zona de contact la o adâncime de aprox. 2 mm ca și în cazul când acest gradient nu există, valoarea maximă este de 290 MPa, această valoare a tensiunii fiind mai mică cu aproximativ 22 MPa în comparație cu contactul când gradientul nu este luat în considerație.

4.7. INFLUENȚA VARIAȚIEI DE TEMPERATURĂ DIN MEDIUL AMBIANT ASUPRA STĂRII DE TENSIUNI ȘI DEFORMAȚII SPECIFICE

4.7.1. Modelul AEF

Modelul AEF conține următoarele date de intrare: modelul de material prezentat în tabelul 4.2; sarcina pe roată 90 kN; roată cu diametrul de 920 mm, cu profilul roții S78; șina tip S49, înclinată la 1/20 rad.; ecartamentul căii de 1435 mm; distanța dintre fețele interioare ale celor două roți de 1360 mm; deplasarea laterală a osiei montate: 3; 0 și -5 mm; unghiul de atac: 0°; temperatura pe modelul global care variază de la 20°C până la: -30 °C, 20 °C, 50°C; coeficientul de frecare $\mu=0$.

tabelul 4.2 Proprietăți mecanice ale materialului funcție de temperatură

T, °C	E, GPa	ν	$\alpha \cdot 10^{-5}, ^\circ\text{C}^{-1}$	σ_c , MPa	E_T , GPa
-30	200	0,3	1,15	567	5400
20	200	0,3	1,2	540	4000
50	200	0,3	1,2	540	4000

4.7.2. Rezultate obținute

Se constată variații considerabile ale tensiunii în funcție de modelul de material și variațiile de temperatură, maximul fiind mai mare pentru cazul când se consideră proprietățile materialului la -30 °C și variația de -50 °C, aceste variații fiind de până la 12%.

De asemenea, s-a constatat că tensiunile în volumul șinei sunt mai mari pentru variații ale temperaturii, valorile luate în considerare fiind de -50 °C și +30 °C.

Pentru deplasarea osiei montate la 3 mm nu s-au constatat deformații plastice pentru toate cele trei scenarii studiate. Deformații plastice au fost obținute pentru deplasarea osiei montate la 0 și -5 mm. Din imagini se observă că, pentru scenariul când temperatura nu variază și proprietățile de material sunt cele obținute în laborator la temperatura de 20 °C, ambele elemente care se află în contact se deformează plastic la fel. Pentru scenariul când temperatura variază cu -50 °C iar proprietățile de material sunt cele obținute în laborator la temperatura de -30 °C, șina se deformează mai mult. Pentru scenariul când temperatura variază cu +30 °C iar proprietățile de material sunt cele obținute în laborator la temperatura de +20 °C, roata se deformează mai mult.

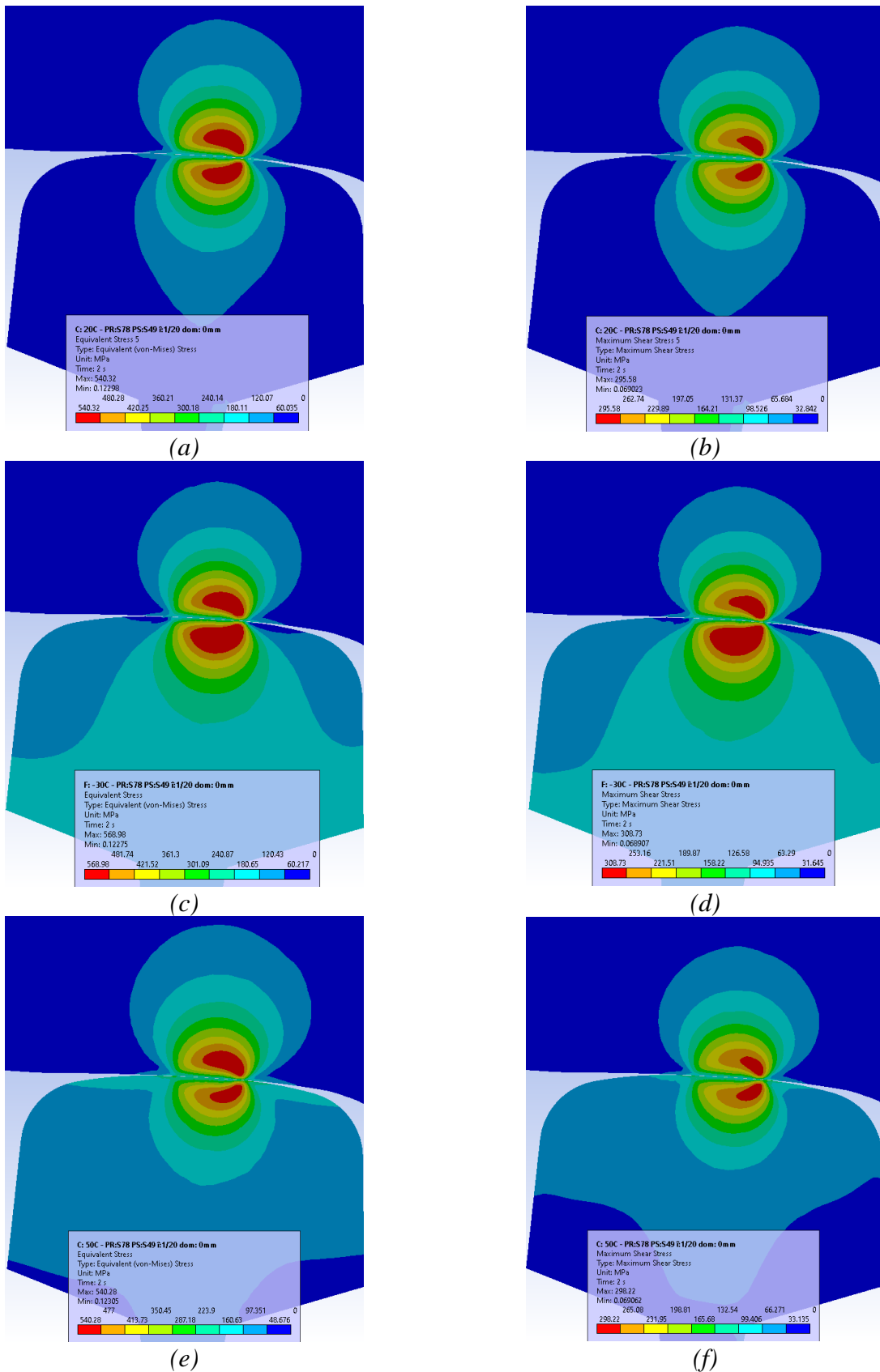


figura 4.37 Rezultatele obținute a stării de tensiuni von-Mises și stării de tensiuni tangențiale maxime funcție de variația de temperatură (20 °C, -30 °C și 50 °C) pentru deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

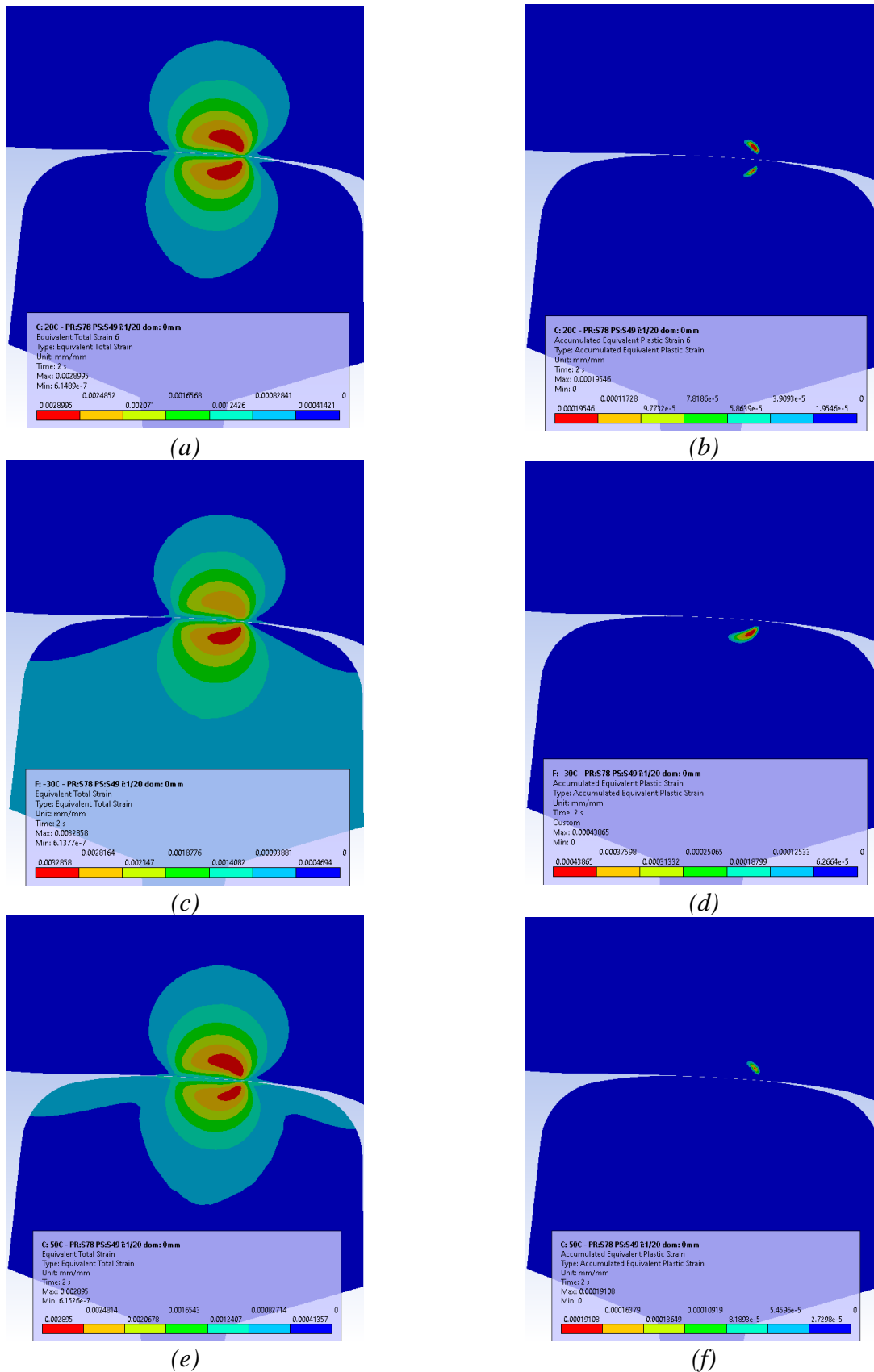


figura 4.38 Rezultatele obținute a stării de deformații specifice totale și a stării de deformații specifice plastice funcție de variația de temperatură (20 °C, -30 °C și 50 °C) pentru deplasarea laterală a osiei montate la 0 mm

4.8. INFLUENȚA FORȚEI TRANSVERSALE ASUPRA STĂRII DE TENSIUNI, DEFORMAȚII, DEFORMAȚII SPECIFICE ȘI GRADIENTULUI DE PRESIUNI

4.8.1. Descrierea problemei

Din observări în situ ale șinelor și bandajelor de locomotivă exploatare în România, au fost observate uzuri considerabile ale ciupercii șinei și în zona buzei roții/bandajului, atât la mișcarea materialului rulant în curbe cât și pe linie dreaptă, în zona unde are loc contactul buzei roții cu zona laterală a ciupercii șinei. Astfel, obiectivul acestui subcapitol este de a investiga numeric efectul pe care îl are forța transversală asupra deformațiilor, deformațiilor specifice, stării de tensiuni, distribuției de presiuni, mărimii, locației și formei ariei de contact, la contactul roată-șină.

4.8.2. Rezultate obținute

În figura 4.39 este prezentată deformația totală a roții și șinei în urma solicitării roții cu o sarcină verticală de 90 kN și o forță transversală de 20 kN. Din figură se observă zona potențială de contact de pe profilul de rulare a roții și a șinei și punctul inițial de contact. În urma încărcării roții cu sarcina verticală din contact punctual și forma eliptică, contactul s-a transformat în contact bi-punct.

Starea de tensiuni echivalente (von-Mises) dezvoltate în secțiunea roții și a șinei este prezentată în figura 4.40÷figura 4.33. Maximul tensiunii von-Mises de 578 MPa în șină și roată este obținut în zona de contact alăturată buzei roții la o adâncime de aprox. 0.78 mm în ambele structuri; valorile tensiunilor sunt obținute subiacent suprafeței de rulare unde este locația presiunii maxime de 1703 MPa. Pentru celălalt punct de contact care și-a făcut apariția în timpul încărcării roții, maximul este de 530 MPa și se află la adâncimea de 1,68 mm în ambele structuri. Volumul de material unde tensiunile au valori de peste 300 MPa este cu mult mai mare decât în cazul contactului localizat în zona centrală a ciupercii șinei. Valorile obținute ale tensiunilor echivalente sunt peste limita de curgere a materialului, din această cauză zona din apropierea tensiunii maxime se va deforma plastic.

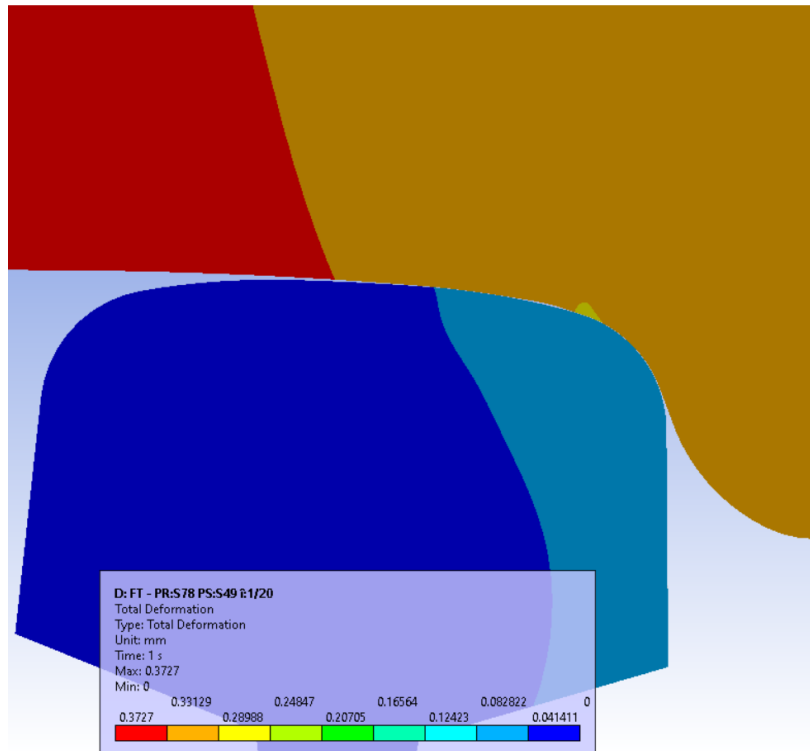


figura 4.39 Starea de deformații totale pe roată și șină la interacțiunea roată-șină pentru o forță verticală de 90 kN și forța transversală de 20 kN conform modelului de material elastic-plastic

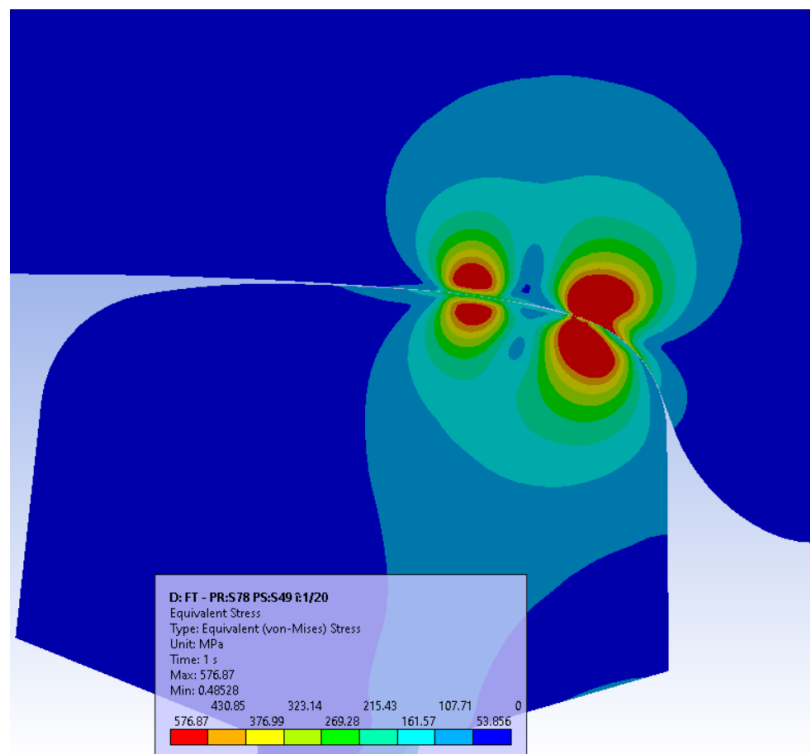


figura 4.40 Starea de tensiuni echivalente (von-Mises) pe roată și șină la interacțiunea roată-șină pentru o forță verticală de 90 kN și forța transversală de 20 kN conform modelului de material elastic-plastic

Starea de tensiuni tangențiale maxime în secțiunea roții și șinei este prezentată în figura 4.41. Maximul tensiunii tangențiale este de aprox. 333 MPa, în șină și roată și este obținută în zona de

contact alăturată buzei roții la o adâncime de aprox. 0.78 mm în ambele componente; valorile tensiunilor sunt obținute subiacent suprafeței de rulare unde este locația presiunii maxime de 1703 MPa. Pentru celălalt punct de contact care și-a făcut apariția în timpul încărcării roții, maximul este de 284 MPa și se află la adâncimea de 1,68 mm în ambele structuri.

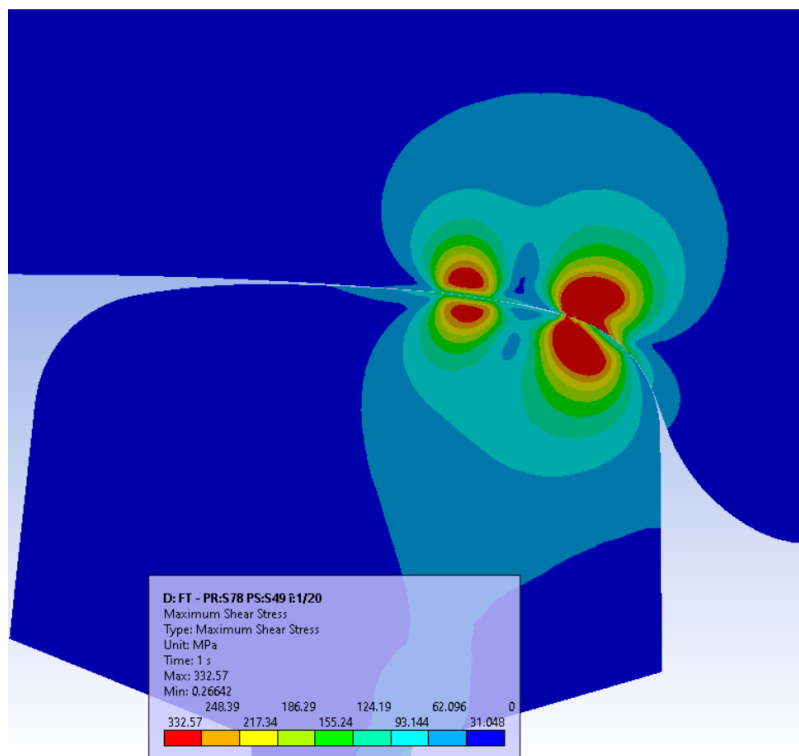


figura 4.41 Starea de tensiuni tangențiale maxime pe roată și șină la interacțiunea roată-șină pentru o forță verticală de 90 kN și forță transversală de 20 kN conform modelului de material elastic-plastic

Deformațiile specifice totale și plastice în secțiunea roții și șinei sunt prezentate în figura 4.42 și figura 4.43. Maximul deformației specifice totale și plastice este localizat în zona tensiunii echivalente maxime. Cea mai mare valoare a deformației plastice este de 0.02 mm/mm fiind localizată la aceeași distanță de suprafața de rulare ca și tensiunea maximă. Din figură se poate observa curgerea materialului de la suprafața de rulare în ambele componente. Volumul de material care se deformează plastic este cu mult mai mare pentru materialul roții. Având în vedere că materialul se deformează plastic începând cu suprafața de rulare se poate concluziona că volumul de material din această zonă va fi un nucleu pentru fisuri și va facilita propagarea acestora.

Aria totală de contact este de 302, 58 mm² iar presiunea maximă obținută este de 1703 MPa. Luând în calcul faptul că presiunea de contact are valori mari, materialul se va uza cu mult mai intens în aceste zone decât în cazul în care contactul este situat în zona centrală a profilului roții și șinei. În plus, știind faptul că materialul roții are valori mai mici ale durezzații decât cel al șinei, roata în această zonă se va uza mai intens decât materialul șinei.

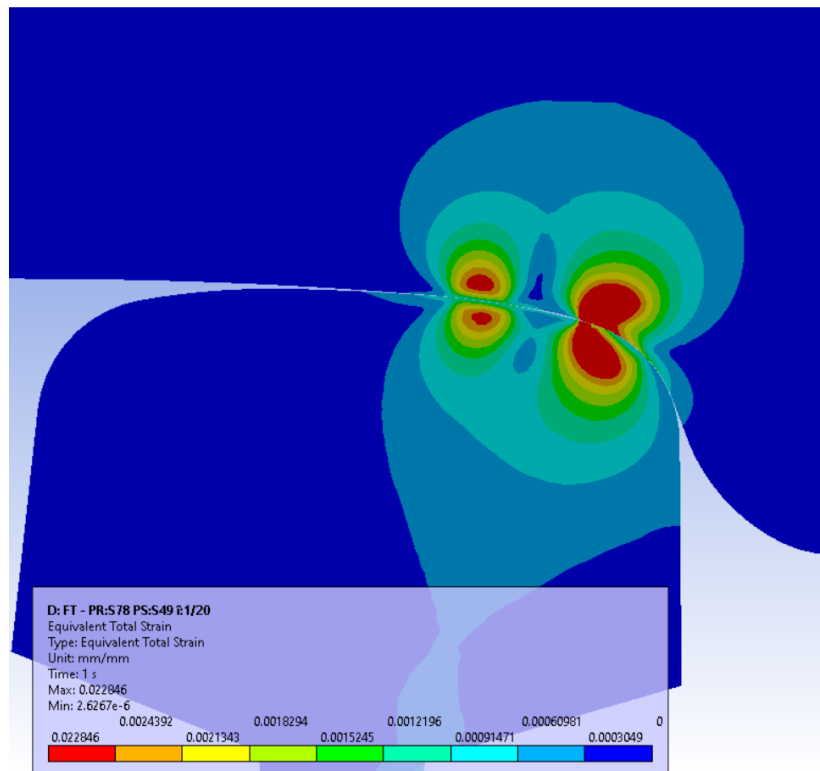


figura 4.42 Starea de deformații specifice totale pe roată și șină la interacțiunea roată-șină pentru o forță verticală de 90 kN și forța transversală de 20 kN conform modelului de material elastic-plastic

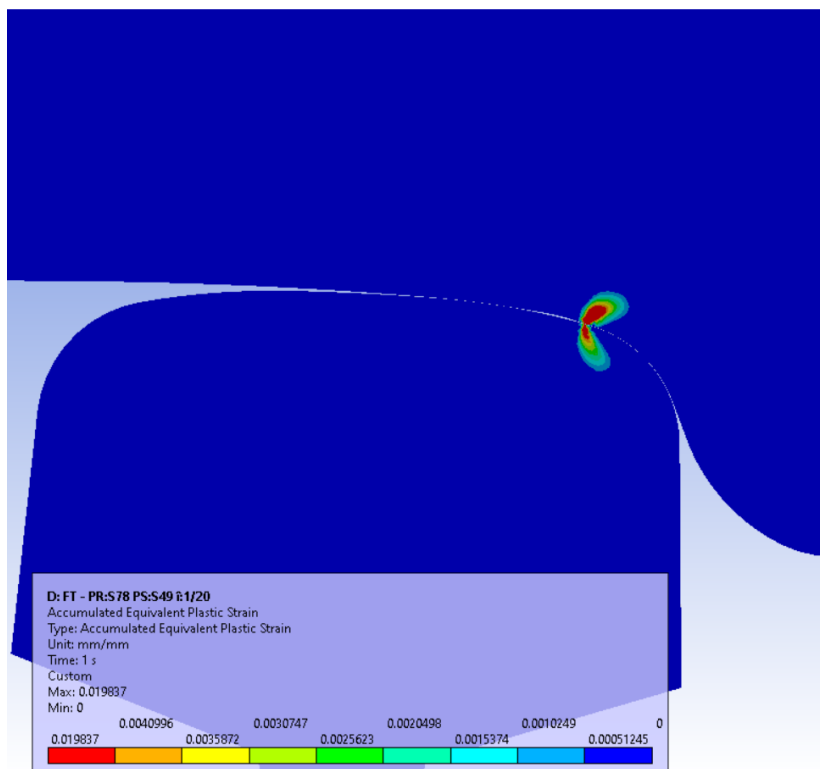


figura 4.43 Starea de deformații specifice plastice pe roată și șină la interacțiunea roată-șină pentru o forță verticală de 90 kN și forța transversală de 20 kN conform modelului de material elastic-plastic

4.9. CONCLUZII

- Modelul AEF creat servește ca instrument eficient în orice analiză tribologică pentru analiza interacțiunii roată-șină, a fenomenelor de deteriorare și în vederea unei proiectări optime. Este rapid pentru obținerea rezultatelor specifice contactului ne-hertzian roată-șină cu geometrii reale supuse sarcinii normale. S-a pus accentul în ceea ce privește păstrarea transferului de sarcină de la osie la șină. Rezultatele simulărilor sunt studiate în vederea determinării efectelor cauzate de: sarcina verticală, forța transversală, profilul de rulare al șinei și roții, geometria șinei, înclinarea șinei, proprietăți mecanice ale materialelor din care sunt confecționate roțile și șinele de cale ferată, gradientul de temperaturi generat în faza regimului de frânare, variații ale temperaturii mediului ambiant și neomogenității roții de cale ferată asupra distribuției de presiuni, stării de tensiuni tangențiale maxime și von-Mises, stării de deformații, stării de deformații specifice.
- Rezultatele obținute în acest capitol luând în considerare modelul de material elastic, elastic-perfect plastic, elastic-plastic și multiliniar;
- Modelul dezvoltat oferă posibilitatea de parametrizare a parametrilor geometrici, de material, fizici, de contact, analiză și rețea;
- Rezultatele obținute sunt apropiate cu cele obținute de alți cercetători;
- În timpul deplasării materialului rulant, poziția relativă a roții față de șină se modifică în permanență. Modificarea valorii deplasării laterale a osiei montante a determinat schimbări importante privind: locația contactului, aria de contact, distribuția de presiuni și valoarea presiunii maxime;
- Rezultatele obținute au demonstrat o influență semnificativă a înclinării șinei asupra presiunii, tensiunii, deformațiilor, locației punctului de contact, mărimea și forma ariei de contact;
- Deplasarea laterală a osiei montate are o influență semnificativă asupra valorilor tensiunilor, maximele fiind înregistrate la o deplasare de -4 mm și -5 mm pentru toate scenariile studiate;
- Valori favorabile ale tensiunilor au fost obținute pentru cazul în care roata este cu profil de uzură S1002 iar șina este înclinată la 1/40 rad;
- Din rezultatele obținute s-a constatat că subiacent suprafeței de rulare în zona de contact, tensiunile ating valori semnificative, dar sunt localizate într-un volum mic de material. Mărimea acestei regiuni este proporțională cu dimensiunea ariei de contact;

- Rezultatele obținute au demonstrat o influență semnificativă a profilului ciupericii șinei asupra stării de tensiuni, stării deformațiilor, distribuției de presiuni, locației punctului de contact, mărimii și formei zonei de contact;
- Valori favorabile ale tensiunilor au fost obținute pentru cazul contactului roții cu profil S78 și șină de tip S49;
- Când o șină de tip S49 uzată intră în contact cu o roată având profilul S78, locația, aria și forma zonei de contact se modifică și astfel este modificată și distribuția de presiuni. Aria de contact scade semnificativ, se deplasează pe suprafața exterioară a șinei, ducând la o creștere a presiunilor de contact, al căror nivel ajunge peste limita de curgere, ceea ce provoacă deformarea plastică a materialului din volumul imediat zonei de contact al șinei și roții. Astfel, putem concluziona că uzura influențează negativ durabilitatea elementelor ce se află în contact;
- Tensiunile mari de contact care apar în cazul interacțiunii cu șina uzată, în care profilul roții se sprijină pe șină cu marginea sa exterioară sau zona de contact este puțin deplasată de marginea exterioară a roții, conduc la apariția unei proeminențe (buză falsă) în partea exterioară a roții pe suprafața de rulare;
- Când materialul rulant se mișcă, se modifică în permanență poziția laterală a osiei montate, ceea ce duce la apariția diferitelor combinații ale zonelor de contact ale șinei și roții, ca efect aceasta are o influență semnificativă asupra tensiunilor, maximele fiind înregistrate la o deplasare de -5 mm pentru toate scenariile studiate;
- Din rezultatele obținute se remarcă faptul că, valori mai mici ale tensiunilor și ale presiunilor au fost obținute pentru scenariul în care șina este de tip S49. De asemenea, se remarcă faptul că pentru o înclinare a șinei de $1/20$, o interacțiune mai favorabilă o are roata cu profil S78, iar pentru înclinarea de $1/40$, roată cu profil S1002;
- Rezultatele obținute ne oferă posibilitatea de adopta modelul de material care va descrie mai în detaliu comportamentul structurii în exploatare și în final luarea de decizii;
- Preferabile sunt modelele de material elastic-plastic și multiliniar pentru o mai bună analiză a structurii, mai ales atunci când vorbim de interacțiune sub presiuni mari de contact, ca în cazul trecerii roții peste aparatele de cale sau trecerea peste joante;
- Proprietățile mecanice impuse în modelul AEF nu influențează în mod semnificativ rezultatele obținute pentru distribuția de presiuni, locația, aria și forma zonei de contact;

- În cazul în care materialele sunt solicitate peste limita de curgere, materialul cu o limită de curgere mai mică se va deforma plastic mult mai intens;
- Rezultatele obținute au demonstrat o influență semnificativă a proprietăților mecanice neomogene a roții asupra stării de tensiunii, stării de deformații specifice totale și plastice;
- A fost studiată influența proprietăților mecanice neomogene pentru materialul roții la rezolvarea problemei de interacțiune a roții cu șina;
- Într-o problemă care ține cont de neomogenitate, are loc o creștere a tensiunilor în regiunea apariției deformațiilor totale maxime, care apare din cauza creșterii limitei de curgere a materialului roții, comparativ cu proprietățile omogene. În celelalte zone, tensiunile sunt practic aceleași;
- Se observă, de asemenea, o scădere a deformațiilor specifice totale, o creștere a deformațiilor elastice și dispariția deformațiilor plastice. Din rezultatele obținute se poate observa că o modificare relativă semnificativă se observă doar pentru deformațiile plastice (o scădere cu 100%);
- În general, analizând rezultatele obținute, putem concluziona că luarea în considerare a neomogenității proprietăților afectează starea de tensiuni, dar modificări semnificative se observă doar pentru deformațiile plastice. Astfel, este indicat să se țină cont de neomogenitate doar atunci când se rezolvă problemele în care este nevoie de a descrie cât mai exact comportamentul roții (totuși, în acest caz, va fi cel mai corect să se determine experimental proprietățile mecanice). În toate celelalte cazuri, va fi suficient să utilizăm proprietățile mecanice medii privind caracteristicile pe distanța subiacentă suprafeței de rulare;
- Sunt prezentate rezultatele obținute ca urmare a gradientului de temperaturi generate în timpul fazei de frânare asupra stării de tensiunii, stării de deformații, distribuției de presiuni, locației punctului de contact, ariei și formei zonei de contact;
- Volumul de material care suportă o deformare plastică este cu mult mai mare și se află la adâncimi de 3-4 ori mai mari față de contactul fără gradient de temperatură. Zona de deformare plastică devine un nucleu de fisuri la adâncimi mai mari;
- Tensiuni echivalente și maxime având valori mari se află pe un volum mai mare de material în comparație cu contactul studiat anterior, valorile maximumului de tensiuni și locația acestuia nu se modifică considerabil prin prezența contactului cu șină, cu excepția volumului din zona alăturată contactului;

- Rezultatele obținute au demonstrat o influență semnificativă a variației de temperatură la interacțiunea roată-șină asupra stării de tensiuni și deformații specifice;
- Se observă o stare de tensiuni cu valori cu mult mai mari în volumul materialului șinei la o variație a temperaturii de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ și $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ceea ce poate conduce la propagarea fisurilor care sunt situate la adâncimi mai mari;
- Variații ale tensiunilor echivalente și tangențiale maxime de până la 13% au fost obținute pentru scenariul în care temperatura mediului ambiant este de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ față de scenariul în care temperatura este de $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Sunt propuse următoarele măsuri pentru funcționarea în siguranță și îmbunătățirea performanței sistemului roată-șină:
 - optimizarea forțelor de frecare între roată și șină prin introducerea unui sistem eficient de ungere;
 - optimizarea regimului de frânare prin introducerea de saboți care dezvoltă temperaturi mai mici în cupla roată-sabot și/sau implimentarea unui sistem mecatronic care va fi mai eficient în faza regimului de frânare;
 - monitorizarea periodică asupra încălzirii structurilor de pe suprafața de rulare a roții;
 - realizarea unui sistem informatic care să conțină informații despre defecțiuni, tipul, timpul și cauzele defectării osiilor montate;
 - limitarea vitezei pe segmentele unde au fost găsite defecte pe cale.
- Rezultatele obținute au demonstrat o influență semnificativă a forței transversale asupra stării de tensiunii, stării deformațiilor, distribuției de presiuni, locației punctului de contact, ariei și formei de contact;
- La astfel de contact se observă cele mai mari deformații plastice, fiind situate și la distanțe mai mici de suprafața de rulare a șinei și roții în comparație cu alte contacte;
- Creșterea valorii relative a maximumului tensiunii echivalente, creșterea deformațiilor specifice totale și apropierea de suprafața de contact a punctului de maxim, influențează negativ durabilitatea la oboseala de contact a roții și șinei, care funcționează sub o solicitare de contact cu rostogolire sau cu alunecare.

CAPITOLUL 5: MODELAREA CONTACTULUI ROATĂ/ȘINĂ PRIN METODA AEF ÎN REGIM TRANZITORIU

5.1. MODELAREA DEPLASĂRII ROȚII DE VAGON DE MARFĂ ÎN REGIM TRANZITORIU

5.1.1. Descrierea problemei

Obiectivul acestui studiu este de a investiga numeric efectul produs de un defect de tip loc plat pe roată și de discontinuități ale șinei, asupra deformațiilor specifice, stării de tensiuni, distribuției de presiuni, ariei și formei zonei de contact, la contactul roată-șină.

5.1.2. Rezultate obținute

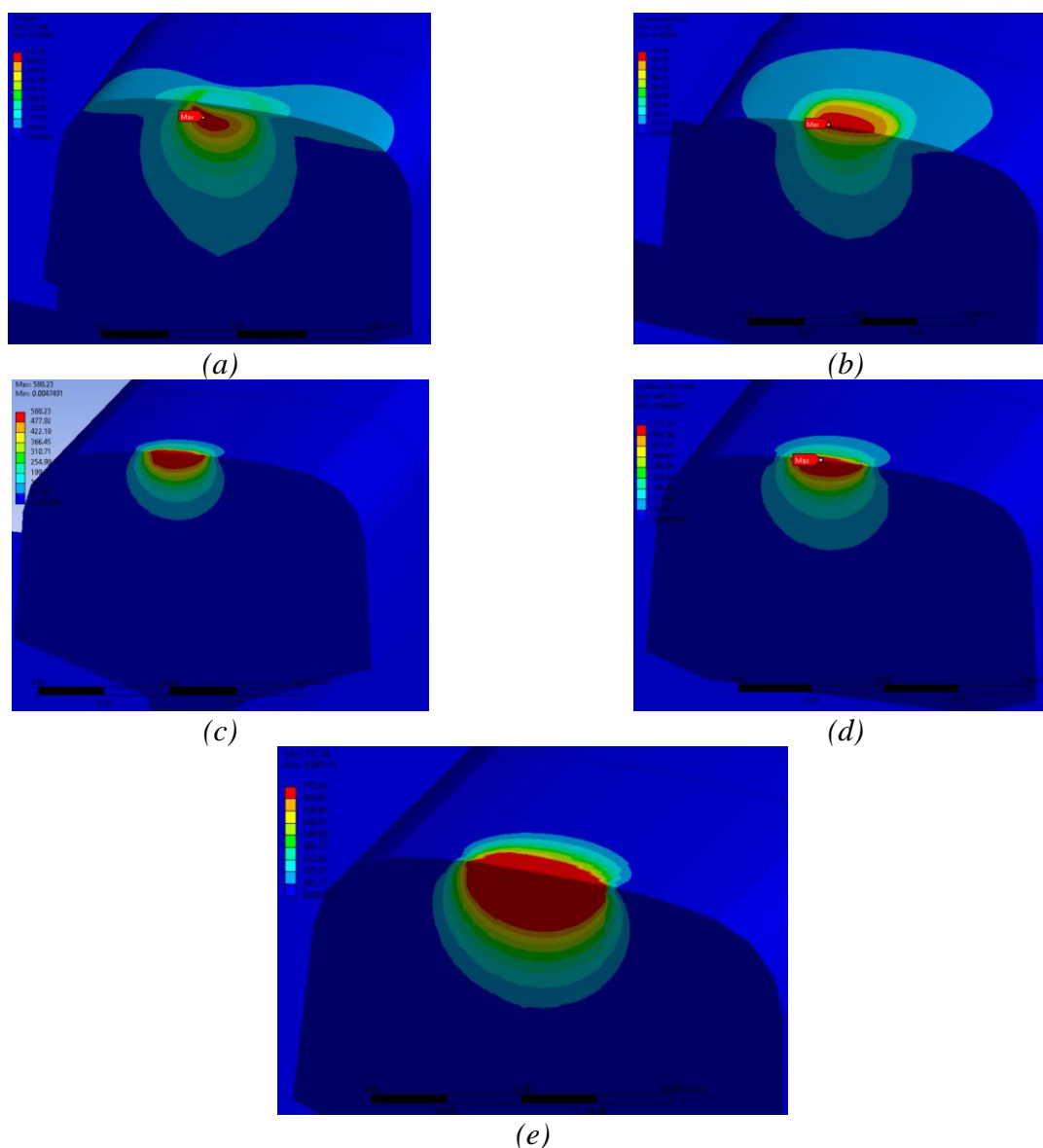


figura 5.1 Rezultatele obținute ale tensiunilor echivalente von-Mises:
 (a) – rostogolire pură $\mu = 0,3$; (b) – alunecare pură $\mu = 0,3$; (c) – joante (distanța dintre șine 0 mm); (d) - joante (distanța dintre șine 5 mm); (e) – joantă (distanța dintre șine 10 mm);

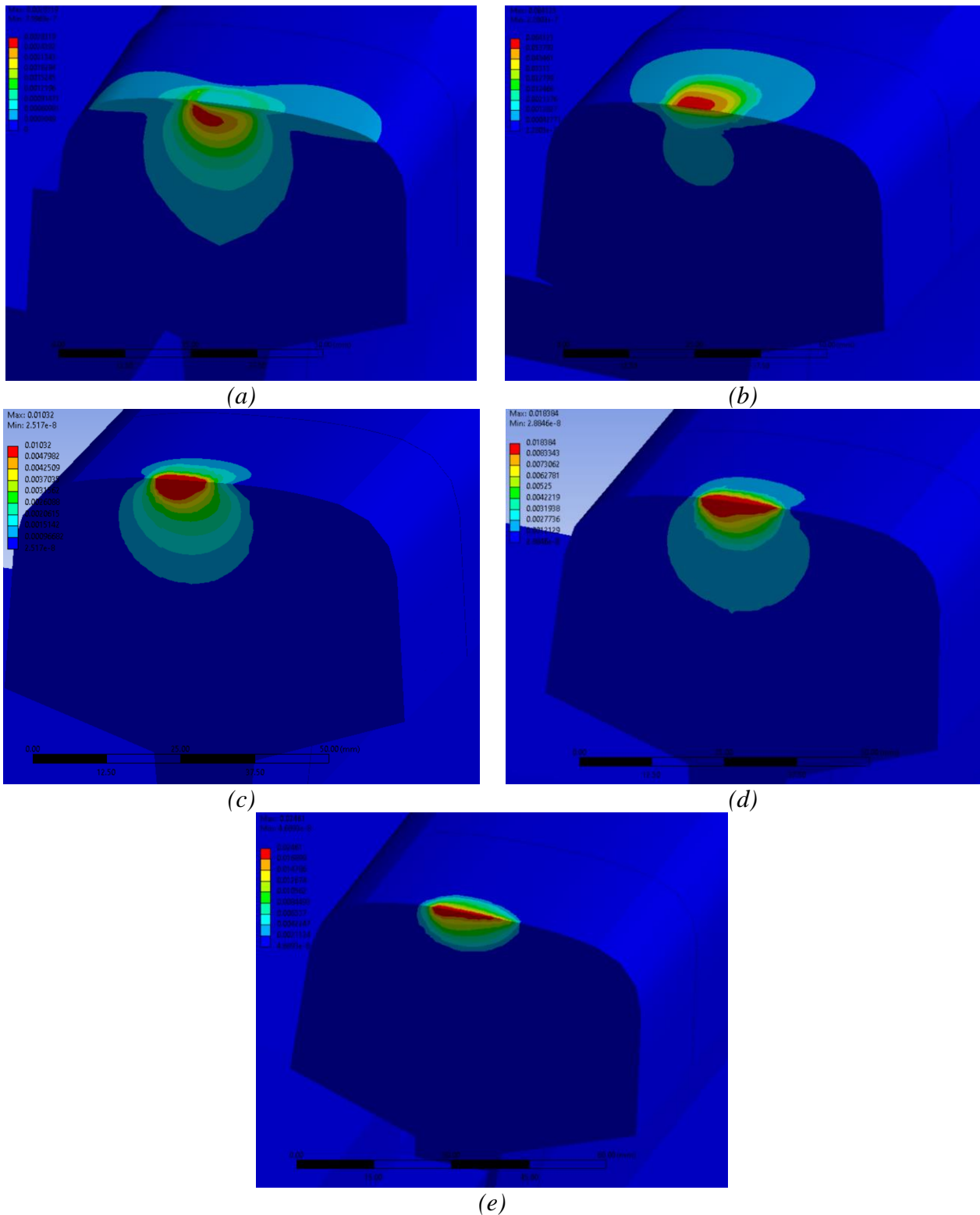


figura 5.2 Rezultatele obținute ale deformațiilor specifice totale:
 (a) – rostogolire pură $\mu = 0,3$; (b) – alunecare pură $\mu = 0,3$; (c) – joante (distanța dintre șine 0 mm); (d) - joante (distanța dintre șine 5 mm); (e) – joantă (distanța dintre șine 10 mm);

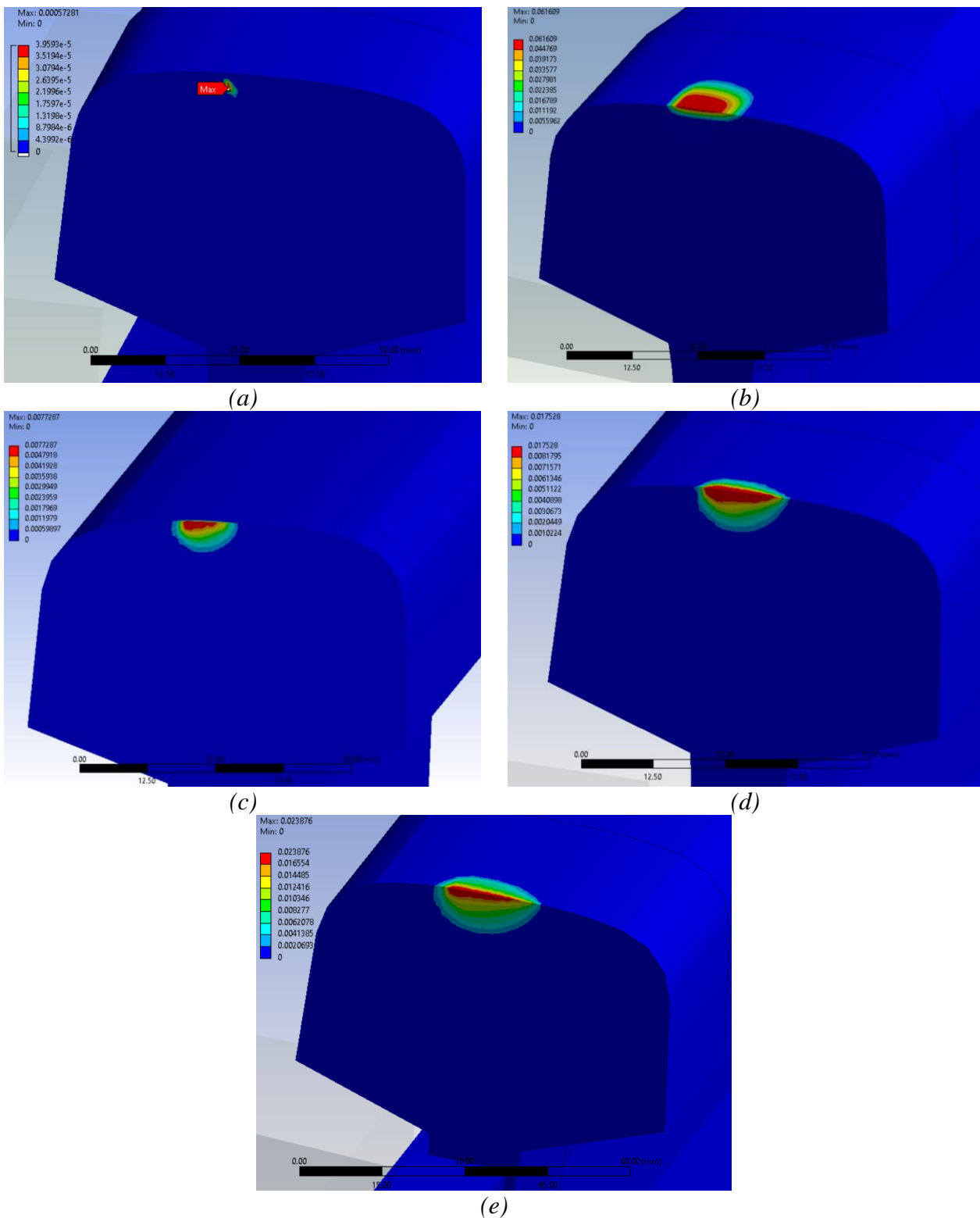


figura 5.3 Rezultatele obținute ale deformațiilor plastice echivalente:
 (a) – rostogolire pură $\mu = 0,3$; (b) – alunecare pură $\mu = 0,3$; (c) – joante (distanța dintre șine 0 mm); (d) - joante (distanța dintre șine 5 mm); (e) – joantă (distanța dintre șine 10 mm);

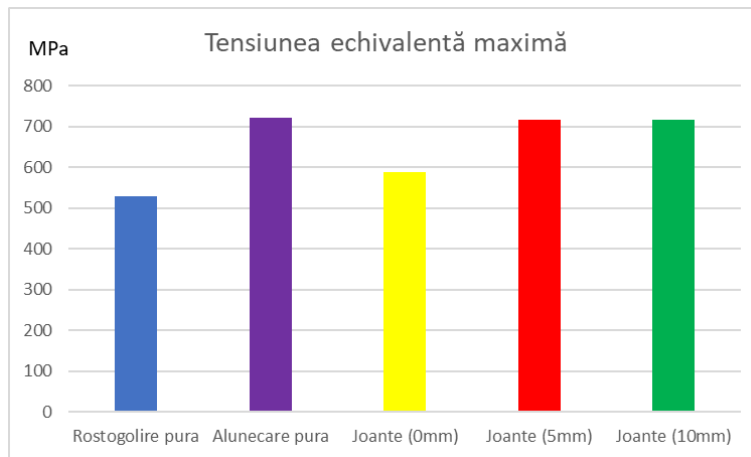


figura 5.4 Comparații a tensiunilor echivalente maxime obținute pentru diferite scenarii de încărcare/rezemare

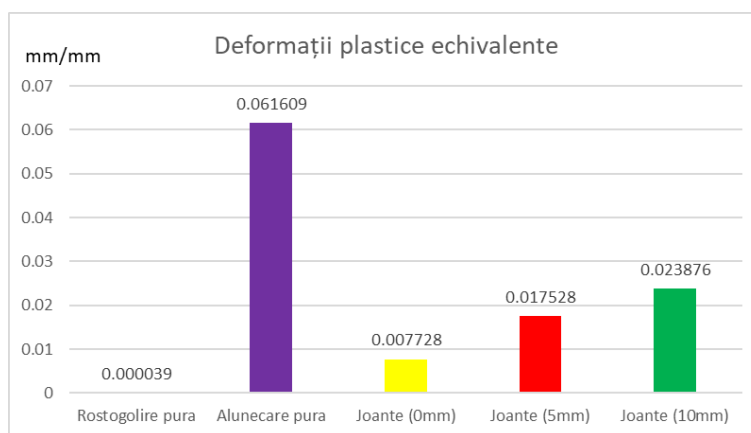


figura 5.5 Comparații a deformațiilor plastice echivalente obținute pentru diferite scenarii de încărcare/rezemare

5.2. CONCLUZII

Din cauza limitărilor metodei elementului finit, efectul dinamic al sarcinii pe axă cauzat de vibrația vehiculului și a componentelor de cale ferată a fost neglijat în acest studiu. Forța laterală în modelele prezentate mai sus a fost, de asemenea, considerată zero. Dacă toate aceste efecte ar fi incluse, nivelul tensiunii ar putea să fie mai mare, iar astfel deteriorarea ar putea fi mai ușor declanșată.

Din rezultatele obținute se constată următoarele:

- Tensiunea echivalentă maximă pentru toate cazurile în afară de cel în care roata este în rostogolire pură este obținută la suprafață, astfel deteriorarea este anticipată să apară la suprafață;
- Deformațiile echivalente plastice maxime este obținută pentru cazul când roata este în alunecare pură;
- Tensiunile și deformațiile maxime cresc pe măsură ce distanța dintre șine crește, astfel deteriorarea șinei va fi mai mare cu cât distanța între șine crește.

CAPITOLUL 6: MODELAREA DEPLASĂRII BOGHIULUI ÎN ALINIAMENT ȘI ÎNSCRIEREA ÎN CURBE

6.1. MODELAREA DEPLASĂRII ÎN ALINIAMENT A BOGHIULUI VAGONULUI DE MARFĂ

6.1.1. Descrierea problemei

Scopul studiului este modelarea prin AEF a boghiului unui vagon de marfă în mișcare rectilinie și de a investiga efectul produs de ansamblu asupra deformațiilor, deformațiilor specifice, stării de tensiuni, distribuției de presiuni, ariei și formei zonei de contact la contactul roată-șină. Rezultatele obținute din analiză pot fi utile la optimizarea ansamblului boghiu.

6.1.2. Rezultatele obținute

Distribuția de deformații specifice echivalente și tensiunile echivalente sunt prezentate în Figura 6.1 a); b).

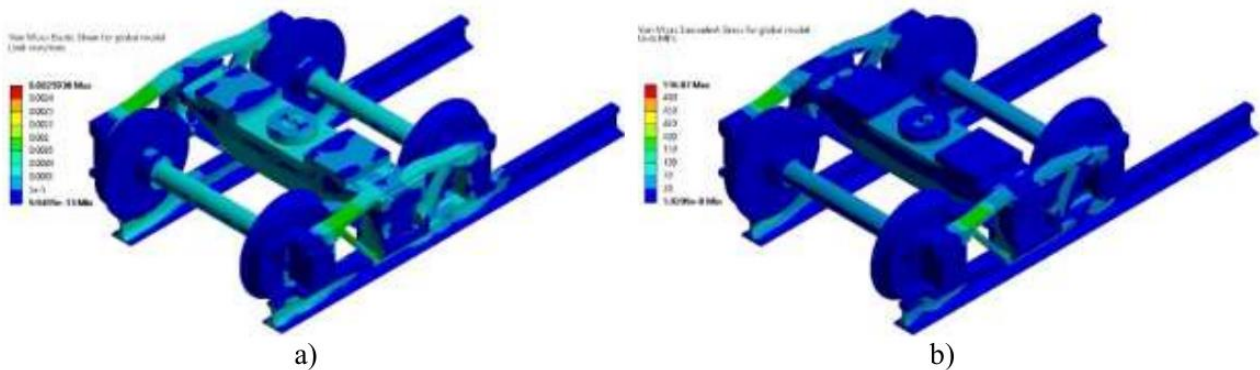


Figura 6.1 Distribuția de tensiuni echivalente și deformații specifice al ansamblului global: a) Deformații specifice echivalente; b) Tensiuni echivalente von-Mises

Distribuția de accelerații și viteze sunt reprezentate în Figura 6.2 a); b).

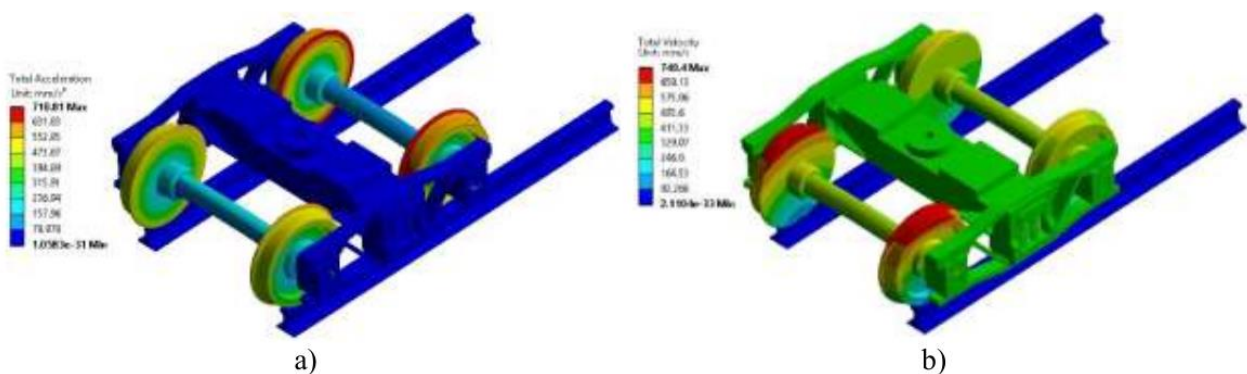


Figura 6.2 Distribuția accelerațiilor și a vitezelor pentru modelul global: a) Distribuția de accelerații; b) Distribuția de viteze

În Figura 6.1 a), este prezentat distribuția de tensiuni von-Mises pentru modelul global pentru $\mu = 0.2$. Pentru traversa pivotantă, tensiunea maximă este de 202 MPa, iar pentru traversele laterale

valoarea maximă a tensiunii este în jur de 175 MPa. Valoarea maximă a tensiunii de aprox. de 520 MPa din modelul global este obținută în interiorul suprafeței exterioare a șinei la o adâncime de 2.7 mm, rezultatul obținut fiind foarte apropiat de rezultatul obținut în capitolul 4, iar pentru roți, tensiunea maximă este descoperită subiacent suprafețelor de rulare la o adâncime de 3.2 mm, fiind în jur de 478 MPa, valorile acestea fiind sub limita de proporționalitate pentru materialul șinei/roții pentru cele trei noduri de contact. Accelerările maxime calculate pentru modelul global sunt înregistrate pe roată și sunt de aproximativ 710 mm/s^2 , în timp ce cea minimă este înregistrată pe traversa pivotantă și în șină, fiind 0 mm/s^2 . Distribuțiile de viteze sunt prezentate în Figura 6.2, iar vitezele maxime sunt, de asemenea, înregistrate pe roți, fiind de 740 mm/s . Hărțile de contur ale presiunii/tensiunii de frecare între roată/șină sunt reprezentate în figura de mai jos.

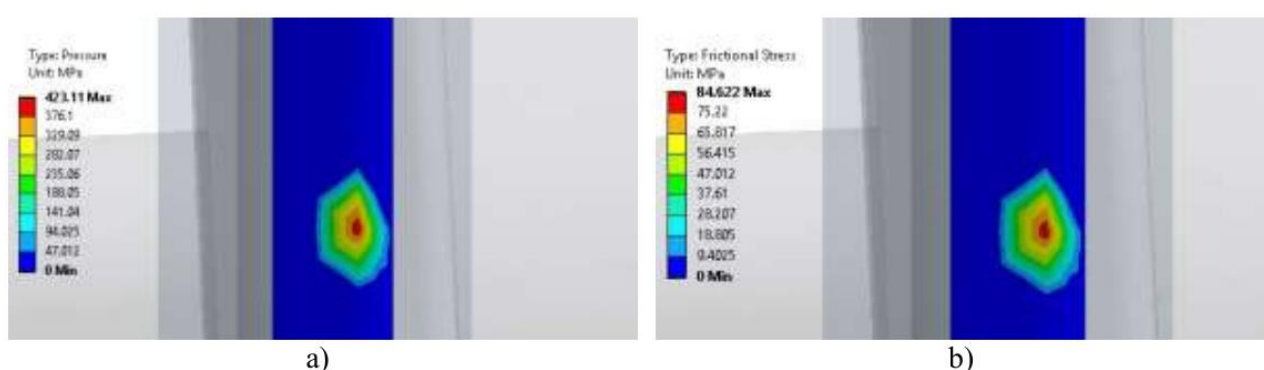


Figura 6.3 Distribuția de presiuni și tensiuni la contactul roată/șină: a) Presiuni de contact; b) Tensiuni de frecare;

6.2. CONCLUZII

- Modelul AEF creat servește ca un instrument eficient pentru analiza interacțiunii roată-șină și optimizarea acesteia. Este rapid pentru a obține rezultatele specifice în contactul ne-hertzian roată-șină cu geometrii reale supuse sarcinii normale.
- Modelul dezvoltat oferă posibilitatea de parametrizare a parametrilor geometrici, de material, fizici, de contact, de analiză și discretizare;
- Rezultatele obținute au demonstrat o influență semnificativă a profilului ciupercii șinei asupra stării de tensiuni, stării deformațiilor, distribuției de presiuni, locației punctului de contact, ariei și formei zonei de contact;
- Uzura influențează negativ rezultatele de interacțiune, obținându-se cele mai mari valori ale tensiunilor;

CONCLUZII GENERALE

Din analiza tezei, se deduc, structurate pe capitole, următoarele concluzii generale:

Capitolul I:

Din studiul de sinteză efectuat în primul capitol, s-au desprins următoarele direcții de cercetare:

- cercetări privind metalografia și proprietățile mecanice ale roților și șinelor de cale ferată ce au fost în exploatare;
- cercetări privind studiul experimental al contactului roată – șină prin metoda fotoelastică;
- cercetări privind studiul uzurii, determinarea parametrilor de aderență și determinarea intensității de uzare la contactul roată – șină;
- studii teoretice privind contactul concentrat ne-Hertzian și dezvoltarea mai multor modele prin metoda elementelor finite care să permită determinarea rapidă a distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența frecării asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența temperaturii asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența proprietăților de material asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența parametrilor geometrici ai căii asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența defectelor și a uzurii asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența neomogenității materialului asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența parametrilor liniei de cale ferată asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- modelarea 3D a boghiului privind distribuția de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină la mișcarea în aliniament și în curbă.

Capitolele II-III:

În cadrul acestor determinări s-au efectuat încercări pe probe prelevate din patru tipuri de șine și una din bandaj: șina '85, șina '86 și șină UIC60 care au funcționat în exploatare, cât și o probă din

șina nouă, neutilizată, și un bandaj de locomotivă uzat, toate materialele respectând specificațiile necesare pentru a fi utilizate în scopul transportului de material rulant din România. În aceste condiții, pe baza rezultatelor obținute în cadrul determinărilor efectuate la punctele 3.2-3.13, se pot trage concluzii asupra duratei de viață rămase pentru exploatare, și condițiile în care se poate face exploatarea acestor șine. În cele ce urmează se vor scoate în evidență, pentru fiecare determinare în parte, diferențele existente între caracteristicile șinei noi și a celor semibune (șine care au lucrat un număr de ani în exploatare), precum și abaterile în raport cu prevederile specifice din cadrul standardului ("SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m," 2017). De asemenea se pun în evidență și proprietățile și caracteristicile materialului prelevat din bandajul de locomotivă uzat.

Capitolele IV-VI:

- Având în vedere tendințele de creștere a vitezelor de circulație, creșterea sarcinilor pe osie, dar și diminuarea pierderilor de material din roată respectiv din șină datorate fenomenelor de uzură, apariția uzuri ondulatorii, fracturi ale roții și ale șinei, este necesară cunoașterea distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină. Acestea poate fi obținute fie prin metoda elementelor finite, având ca dezavantaje timpul mare în execuție și necesitatea unor resurse hard performante, fie prin metode numerice dedicate, care, din păcate, au precizia scăzută.
- Folosind o modelare de corp elastic-perfect plastic, s-a obținut un algoritm foarte rapid de rezolvare numerică a distribuției de presiuni la contactul concentrat roată-șină, pentru suprafețe reale, algoritm preliminar absolut necesar pentru orice studiu care necesită analiza stării de tensiuni la o astfel de solicitare, pentru diferite situații ale acestei interacțiuni, modificând numai datele de intrare: modulul de elasticitate longitudinal, coeficientul de interacție transversală, profilul roții, sarcina pe roată, raza roții pe cercul de rulare, unghiul de atac, distanța dintre fețele interioare ale bandajelor, deplasarea laterală a osiei montate, profilul șinei, înclinarea șinei, ecartamentul căii de rulare etc.
- Dacă introducem analitic cele două profile, se constată faptul că atât valoarea presiunii maxime cât și maximul tensiunii von Mises sunt duble pentru situația în care se folosește profilul UIC-ORE pe șină UIC60 cu înclinarea șinei de 1/20, față de exemplul în care șina este înclinată cu 1/40.

A fost remarcat faptul că pentru înclinarea șinei de 1/40 valoarea presiunii maxime este mai mică în cazul folosirii roții cu profilul SI002 pe șinele UIC60 respectiv S49, iar pentru

înclinarea șinei de 1/20 presiunea maximă are valoarea mai mică în cazul folosirii roții având profilul S78 pe șinele UIC60 respectiv S49.

- în timpul deplasării materialului rulant, poziția relativă a roții față de șină se modifică în permanență. Modificarea valorii deplasării laterale a osiei montante a determinat schimbări importante privind: locația contactului, aria de contact, distribuția de presiuni și valoarea presiunii maxime.

Codul de calculator conceput este util în orice analiză tribologică, atât pentru investigarea fenomenelor de deteriorare, cât și pentru studii de caz în vederea unei proiectări optime.

CONTRIBUȚII PROPRII

Din analiza tezei, se deduc, structurate pe capitole, următoarele contribuții proprii:

Capitolul I:

Din studiul de sinteză efectuat în primul capitol, s-au desprins următoarele direcții de cercetare:

- cercetări privind metalografia și proprietățile mecanice ale roților și șinelor de cale ferată ce au fost în exploatare;
- cercetări privind studiul experimental al contactului roată – șină prin metoda fotoelastică;
- cercetări privind studiul uzurii, determinarea parametrilor de aderență și determinarea intensității de uzare la contactul roată – șină;
- studii teoretice privind contactul concentrat ne-Hertzian și dezvoltarea mai multor modele prin metoda elementelor finite, care să permită determinarea rapidă a distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența frecării asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența temperaturii asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența proprietăților de material asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la con-tactul roată-șină;
- influența parametrilor geometrici ai căii asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența defectelor și a uzurii asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența neomogenității materialului asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- influența parametrilor liniei de cale ferată asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină;
- modelarea 3D a boghiului asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină la mișcarea în aliniament și în curbă.

Capitolele II-III:

Cu ajutorul instrumentelor prezentate în capitolul 2 au fost făcute cercetări de laborator descrise în capitolul 3, ce au inclus teste, determinări și încercări asupra probelor prelevate din șină și roată de cale ferată, printre care: încercări la tracțiune; determinarea valorii critice a factorului de intensitate a tensiunii (tenacității la fisurare K_{Ic}); evaluarea vitezei de propagare a fisurii prin oboseală; determinarea tensiunilor remanente; estimarea duratei de viață la oboseală; măsurarea durității în axa suprafeței de rulare și în secțiunea transversală; încercări la forfecare; evaluarea prin ultrasunete; încovoierea prin șoc; analiza chimică, microstructurală, metalografică și difracție de raze X; determinarea adeziunii; evaluarea comportamentului la uzură și estimarea coeficientului de frecare la contactul roată-șină în variantele alese de contaminare ale contactului și a regimului de funcționare; calculul coeficientului de aderență în variantele alese de contaminare a contactului roată/șină; determinarea caracteristicilor fizico-mecanice ale straturilor superficiale din secțiunea transversală; obținerea stării de tensiuni/deformații la contactul roată-șină în cazul prezenței unor concentratori de tensiune în roată și șină pe cale experimentală, unde s-a utilizat fotoelasticitatea.

- **Capitolele IV-VI:**

Cu ajutorul metodei de analiză cu elemente finite, s-au analizat interacțiunile complexe dintre roată și șină pe modele 3D în următoarele regimuri: static, tranzitoriu și dinamic, având în vedere o serie de date de intrare cum ar fi: parametrii geometrici ai căii, roților și șinelor; prezența defectelor; proprietățile fizice și mecanice ale materialului; parametrii cinematici; fenomenele de rostogolire/alunecare, și cuantificarea efectelor ce apar prin măsurarea uzurii, printre altele.

DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Pe baza rezultatelor obținute se evidențiază următoarele direcții de continuare a cercetărilor:

- cercetări privind metalografia și proprietățile mecanice ale roților, ale șinelor de cale ferată și ale aparatelor de cale;
- studii teoretice privind contactul concentrat ne-Hertzian și dezvoltarea unui algoritm robust, care să permită determinarea rapidă a distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină la trecerea peste aparatele de cale;
- influența unghiului de atac asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină, inclusiv la trecerea peste aparatele de cale;
- influența frecării asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină, la trecerea peste aparatele de cale;
- influența rugozității asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină, la trecerea peste aparatele de cale;
- influența uzurii asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină, la trecerea peste aparatele de cale;
- măsurarea „in situ” a coeficientului de frecare pe calea ferată din România;
- implementarea rezultatelor din această teză în elaborarea standardelor, elaborarea caietelor de sarcini, construcția, exploatarea, mentenanța, modernizarea atât a materialului rulant cât și a căilor ferate.

BIBLIOGRAFIE

1. (ASRO), A. D. S. D. R. (2006). SR EN 13232-1 Aplicații feroviare. Cale. Aparate de cale Partea 1: Definiții. In (pp. 47): ASRO.
2. Adam Equipment PW 254 - PW Analytical Balances, 250g. (2019). Retrieved from <https://www.tequipment.net/Adam-Equipment/PW-254/Scales/Weight/>
3. AFER. (2008a). *Raport de investigare asupra deraierii trenului de marfă nr. 50366 aparținând SC UNIFERTRANS SA, la km 586+310 între stațiile CFR Milova și Conop la data de 15 decembrie 2007*. Retrieved from AGIFER:
4. AFER. (2008b). *Raport de investigare asupra deraierii trenului de marfă nr. 60373 aparținând SC COMPANIA DE TRANSPORT FEROVIA SA în H.m. CRICOV la data de 22 februarie 2007*. Retrieved from AGIFER:
5. AFER. (2010). *Raport de investigare al accidentului feroviar produs la data de 18.07.2010 în halta de mișcare Aiud*. Retrieved from AGIFER:
6. AFER. (2011a). *Raport de investigare al accidentului feroviar produs la data de 16.08.2011, pe distanța Lainici - Meri*. Retrieved from AGIFER:
7. AFER. (2011b). *Raport de investigare al accidentului feroviar produs la data de 17.11.2010, pe firul I de circulație, între stațiile de metrou Piața Unirii - Timpuri Noi*. Retrieved from AGIFER:
8. AGIFER. (2012a). *Raport de investigare al accidentului feroviar produs la data de 10.05.2012 în stația CF Rupea de pe raza de activitate a Sucursalei „Centrul Regional de Exploatare, întreținere și Reparații CF” Brașov*. Retrieved from AGIFER.RO:
9. AGIFER. (2012b). *Raport de investigare pentru stabilirea condițiilor și determinarea cauzelor care au condus la ruperea unui număr marc de șine, în perioada 2010-2011, pe raza de activitate a Sucursalei Regionale C.F. Iași - Secția L4 Bacău, pe linia magistrală nr. 500, pe liniile I și II între stațiile de cale ferată Adjud și Bacău*. Retrieved from AGIFER.RO:
10. AGIFER. (2020a). *Raport de investigare al accidentului feroviar produs la data de 13.05.2019, pe raza de activitate a Sucursalei Regionale CF București, în stația CFR Chitila, în circulația trenului de marfă nr.80964, prin deraierea celui de-al 14-lea vagon, de al doilea boghiu, în sensul de mers al trenului*. Retrieved from AGIFER:
11. AGIFER. (2020b). *Raport de investigare privind accidentul feroviar produs la data de 07.06.2019, pe raza de activitate a Sucursalei Regionale de Căi Ferate București, în stația CFR Bucureștii Noi-linia Guvernamentală, prin deraierea vagonului nr.815366538305 (al 7-lea de la siguranță) de al doilea boghiu în sensul de mers și a vagonului nr.815366523125 (al 8-lea de la siguranță) de prima osie în sensul de mers*. Retrieved from AGIFER:
12. AGIFER. (2020c). *Raport de investigare privind accidentul feroviar produs la data de 08.03.2019, pe raza de activitate a Sucursalei Regionale de Căi Ferate Cluj, între haltele de mișcare Telciu și Coșbuc, km 10+718, prin deraierea vagonului nr. 50537131042- 4 aflat în compunerea trenului de călători nr.4136, aparținând operatorului de transport feroviar SNTFC'CFR Călători” SA*. Retrieved from AGIFER:
13. AGIFER. (2020d). *Raport de investigare privind accidentul feroviar produs la data de 23.03.2019 pe raza de activitate a sucursalei regionale de căi ferate brașov, linia 300, între haltele de mișcare bod și feldioara, pe firul i de circulație, în aliniament, la km 188+190 în circulația trenului de marfă r.20285, prin deraierea vagonului seria ha, nr.318127435812*. Retrieved from AGIFER.RO:
14. AGIFER. (2020e). *Raport de investigare privind accidentul feroviar produs la data de data de 21.04.2019, pe raza de activitate a Sucursalei Regionale CF Timișoara, pe linia curentă Vasiova - Reșița Nord, manifestat prin deraierea ultimelor 2 vagoane din compunerea trenului de marfa nr.69492-1*. Retrieved from AGIFER:

15. AGIFER. (2021a). *Raport de investigare privind accidentul feroviar produs la data de 12.02.2020, pe raza de activitate a Sucursalei Regionale de Căi Ferate Craiova, în halta de mișcare Mihăești, prin deraierea primelor 3 vagoane din compunerea trenului nr.20270-1, aparținând Rail Cargo Carrier România SRL*. Retrieved from AGIFER.RO:
16. AGIFER. (2021b). *Raport de investigare privind accidentul feroviar produs la data de 17.02.2020, pe raza de activitate a Sucursalei Regionale de Căi Ferate Craiova, între halta de mișcare Fărcașele și stația CFR Drăgănești Olt, firul II, prin deraierea a 13 vagoane din compunerea trenului nr.34372, aparținând SC Constantin Grup SRL*. Retrieved from AGIFER.RO:
17. Ahlström, J., & Karlsson, B. (1999). Microstructural evaluation and interpretation of the mechanically and thermally affected zone under railway wheel flats. *Wear*, 232, 14.
18. Allen, S. (2016). Passenger transport statistics. Retrieved from https://www.ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_transport_statistics&oldid=274593
19. ASRO. (2011). EN 13715+A1 Aplicații feroviare - Osii montate și boghiuri - Roți - Profil de rulare. In (pp. 31).
20. ASTM A370-21 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. (2021). In (pp. 50).
21. ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. (2021). In (pp. 50).
22. ASTM D5379/D5379M Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. (2019). In (pp. 14).
23. ASTM E23 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. (2018). In (pp. 26).
24. ASTM E399 Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. (2021). In (pp. 38).
25. ASTM E647 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. (2016). In (pp. 49).
26. Bărbîntă, C. I. (2010).
27. Bărbîntă, C. I. (2014). *Influența rugozității și a uzurii asupra distribuției de presiuni și a stării de tensiuni la contactul roată-șină*. (doctor), UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI,
28. Bărbîntă, C. I., Lorenz, P., & Crețu, S. (2010). *The lateral shift of the wheelset and pressure distribution in the wheel-rail contact*. Paper presented at the Proceedings of the ACME 2010 4th International Conference Advanced Concepts in Mechanical Engineering.
29. Bartz, D. (2016). *OBEN IHR FLUGBEGLEITER* (H. B. F. Annette Maennel Ed.). Berlin, Germany: Heinrich-Böll-Stiftung, Airbus Group.
30. Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (T. M. Companies Ed. Ninth Edition ed.).
31. CETR UTM 2. (2021). Retrieved from <https://www.bruckersupport.com/ProductDetail/1137>
32. China presents freight train to break speed record with 350 kmph. (2021). Retrieved from <https://www.railfreight.com/railfreight/2021/01/05/new-claim-for-fastest-freight-train-in-the-world-350-kmph/?gdpr=accept>
33. Coo, B.-C., & Lee, Y.-J. (2020). Railway Vehicle Wheel Restoration by Submerged Arc Welding and Its Characterization. *Sci*, 11. doi:10.3390/sci2020033
34. Crețu, S. (2009). *Contactul concentrat elastic-plastic* (Politehniem Ed.).
35. DAMME, S. (2006). *Zur Finite-Element-Modellierung des stationären Rollkontakts von Rad und Schiene*. Technischen Universität Dresden, Dresden.
36. Drehen von Eisenbahnrädern Radsatz und Neuräderbearbeitung. (2017). In S. Coromant (Ed.), (pp. 50).

37. Dwyer-Joyce, R. S., Yao, C., Zhang, J., Lewis, R., & Drinkwater, B. W. (2009). Feasibility study for real time measurement of wheel-rail contact using an ultrasonic array. *ASME Journal of Tribology*, 131, 9.
38. EN 10045-1 Metallic materials — Charpy impact test — Part 1: Test method. (1990). In (pp. 9).
39. EN 10276-1 Chemical analysis of ferrous materials. Determination of oxygen in steel and iron Sampling and preparation of steel samples for oxygen determination. (2000). In (pp. 14).
40. EN 13262 Railway applications - Wheelsets and bogies - Wheels - Product requirements. (2020). In (pp. 60): CEN.
41. EN 13715 Railway applications. Wheelsets and bogies. Wheels. Tread profile. (2020). In (pp. 34).
42. EN 13749 Railway applications - Wheelsets and bogies - Method of specifying the structural requirements of bogie frames. (2021). In (pp. 59).
43. EN 15227 Railway applications. Crashworthiness requirements for rail vehicles. (2020). In (pp. 62).
44. EN 15566 Railway applications - Railway rolling stock - Draw gear and screw coupling. (2016). In (pp. 72).
45. EN ISO 148-1 Metallic materials - Charpy pendulum impact test - Part 1: Test method. (2017). In (pp. 37).
46. EPOCH LT Ultrasonic Flaw Detector. (2021). Retrieved from <http://www.mistrasgroup.gr/products/ultrasonic/pdf/epochLT.pdf>
47. Esveld, C. (2001). *MODERN RAILWAY TRACK* (D. Z.-v. Nieuwenhuizen Ed. Second ed.): Koninklijke van de Garde BV.
48. Fortescue railway. (2021, 26 March 2022, at 13:51 (UTC)). Retrieved from https://www.en.wikipedia.org/wiki/Fortescue_railway
49. Freight transport statistics - modal split. (2020). Retrieved from https://www.ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Freight_transport_statistics_-_modal_split#Modal_split_in_the_EU
50. *The Future of Rail Opportunities for energy and the environment*. (2019). (R. Priddle Ed.): International Energy Agency.
51. Greenwood, J. A., & Johnson, K. L. (1992). The Behaviour of Transverse Roughness in a Sliding Elastohydrodynamically Lubricated Contact. *Wear*, 153, 11.
52. Guagliano, M., Sangirardi, M., & Vergani, L. (2008). Experimental analysis of surface cracks in rails under rolling contact loading. *Wear*, 265, 7.
53. HASS-KLAU, C., CRAMPTON, G., BIERETH, C., & DEUTSCH, V. (2004). *Bus or light rail - making the right choice - a financial, operational and demand comparison of light rail, guided buses, busways and bus lanes* (2nd ed.): Brighton : Environmental & Transport Planning, 2004.
54. Hertz, H. (1881). Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für reine und angewandte Mathematik*, 16.
55. History of rail transport. (2020). Retrieved from https://www.en.wikipedia.org/wiki/History_of_rail_transport
56. Ibrahim Coric, Björn Täljsten, Thomas Blanksvärd, Gabriel Sas, Ulf Ohlsson, & Elfren, L. (2018). *Railway Bridges on the Iron Ore Line in Northern Sweden – From Axle Loads of 14 to 32,5 ton*. Paper presented at the Engineering the Past, to Meet the Needs of the Future.
57. Instron 8801 SERVOHYDRAULIC FATIGUE TESTING SYSTEM. (2021). Retrieved from <https://www.instron.cn/-/media/literature-library/products/2013/10/8801-fatigue-testing-system.pdf>

-
58. Instrucția de norme și toleranțe pentru construcția și întreținerea căii, linii de ecartament normal. (cu toate corectările și completările ulterioare). (1989). In (pp. 144).
59. *Instrucția pentru întreținerea liniilor ferate nr.300*. (1982). Retrieved from Instrucție TMC. In.
60. Instrucțiuni pentru controlul ultrasonic al șinelor montate în cale, cu ajutorul cărucioarelor monorail tip SZ-52 și SZ-65. In.
61. Instrucțiuni pentru determinarea defectelor șinelor și pentru verificarea șinelor în cale nr. 306. (1972). In (pp. 87): Centrul de documentare și publicații tehnice.
62. *Instrucțiuni pentru lucrările de reparație capitală a liniilor de cale ferată – nr.303*. (2003). Retrieved from
63. Inverted Research Microscope for Materials Testing Leica DMI5000 M. (2021). Retrieved from <https://www.leica-microsystems.com/products/light-microscopes/p/leica-dmi5000-m/gallery/>
64. ISO 1099 Metallic materials — Fatigue testing — Axial force-controlled method. (2017). In (pp. 24).
65. ISO 6892-1 Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature. (2019). In (pp. 78).
66. Jean-Paul Rodrigue, C. C., Brian Slack. (2013). *The Geography of Transport Systems* (R. T. F. G. L. a. N. York Ed. Third edition ed.).
67. Johansson, A., Pålsson, B., Ekh, M., Nielsen, J. C. O., Ander, M. K. A., Brouzoulis, J., & Kassa, E. (2010). Simulation of wheel–rail contact and damage in switches & crossings. *Wear*, 271, 10.
68. Lewis, M. J. T. (2001). Railways in The Greek and Roman World. *University of Hull*, 12.
69. Lichtberger, B. (2005). *Track Compendium - Formation, Permanent Way, Maintenance, Economies* (E. press Ed. 1st ed.).
70. Marshall, M. B., Lewis, R., Dwyer-Joyce, R. S., Olofsson, U., & Björklund, S. (2004). Ultrasonic Characterisation of a Wheel/Rail Contact. *Transient Processes in Tribology*, 8.
71. Mazilu, T., & Dumitriu, M. (2013). *Tehnologia fabricării și reparării materialului rulant de cale ferată* (M. Rom Ed.). București.
72. Microdurimetru model M1C 010 Emco Test. (2021). Retrieved from <http://www.cchapt.ro/index.php/fisa-echipament3>
73. Nadal, M. J. (1896). Theorie de la Stabilité des locomotives, Part II:mouvement de lacet. *Annales des Mines*, 23.
74. Nielsen, J. C. O., & Stensson, A. (1999). Enhancing freight railways for 30 tonne axle loads. *IMEchE*, 213, 9.
75. *Partie 1. Vers une approche tribologique de l'usure ondulatoire*. Retrieved from
76. PhotoStress Analysis. (2021).
77. Pipa, G.-R. (2011). *Contribuții la sporirea fiabilității șinelor de cale ferată, Partea I-a*. (doctor doctor), Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi din Iași", Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi din Iași".
78. Popovici, R. I. (2010). *Friction in Wheel - Rail Contacts*. (PhD), University of Twente, Enschede, The Netherlands,
79. Quanta 200 3D Dual Beam. (2021). Retrieved from <http://www.sem-service.com/quanta-200-3d-feg-dual-beam/>
80. Rail 54E3 (S54). (2021). Retrieved from <https://www.rails.arcelormittal.com/types-rails/transport-rails/european-standards/rail-54e3-s54>
81. Rail Freight | Overview, Rates and Companies. (2020). Retrieved from <https://www.container-xchange.com/blog/rail-freight-overview/>
82. *Rail Method of Measurement - Detailed Measurement*. (2014).
83. Rail Production. (2021). Retrieved from <https://www.voestalpine.com/railway-systems/en/products/rails/rail-production/>
-

84. *Rail welding and reconditioning the permanent way*. (2004). Retrieved from
85. ROUSSEAU, I. (2007, 3 April 2007). 570 km/h train breaks record. Retrieved from https://www.thestar.com/news/2007/04/03/570_kmh_train_breaks_record.html
86. Sakamoto, H., Toyama, K., & Hirakawa, K. (2000). Fracture toughness of medium-high carbon steel for railroad wheel. *Materials Science and Engineering*, A285, 5.
87. Sebeșan, I., Ștefan, V., & Prodan, G. (2015). Analiza profilurilor de uzură la vehiculele de cale ferată. *Sinteze de Mecanică Teoretică și Aplicată*, 6, 10.
88. Shapovalov, V. V., Mogilevskij, V. A., Kul'Bikajan, R. V., Shcherbak, P. N., Majba, I. A., Lubjagov, A. M., . . . Zajkin, D. S. (2004). Russia Patent No.
89. SOLID185 Element Description. (2021). Retrieved 25 May <https://www.ansyshelp.ansys.com>
90. SR EN 13674-1+A1 Aplicații feroviare. Cale. Șine. Partea 1: Șine Vignole cu masa mai mare sau egală cu 46 kg/m. (2017). In (pp. 122): ASRO.
91. SR EN ISO 6506-1 Materiale metalice. Încercarea de duritate Brinell. Partea 1: Metodă de încercare. (2015). In (pp. 26).
92. Stafie. (2010). Retrieved from standartizare, I. R. d. (1990). STAS 112/3-90 Aparate de rulare pentru vehicule de cale ferata cu ecartament normal, bandaje in stare prelucrată pentru roți, dimensiuni. In (pp. 4).
93. STAS 1753-76. (1976). In.
94. *Strain Indicator and Recorder*. (2011). Retrieved from <http://www.vishaypg.com/docs/11102/p3.pdf>; <http://www.vishay-measurements.ca/pdf/instruments/p3.pdf>
95. *Strategia de dezvoltare a infrastructurii feroviare 2021-2025*. (2020). In C. d. c. f. C. S.A. (Series Ed.), *Strategia de dezvoltare a infrastructurii feroviare*, (pp. 296). Retrieved from <http://www.cfr.ro/files/strategie/SDezIF/2020/strategie%20infra%20v4.2.pdf>
96. Talambă, R., & Stoica, M. (2005). *Osia montata* (ASAB Ed.): ASAB.
97. Thermo ARL - ARL 3460 Optical Emission Spectrometer (Thermo Scientific). (2021). Retrieved from <http://www.speciation.net/Database/Instruments/Thermo-ARL/ARL-3460-Optical-Emission-Spectrometer-;i1527>
98. UIC 810-1 Technical specification for the supply of rough rolled non-alloy steel tyres for tractive and trailing stock. (2003). In (pp. 39).
99. UIC 811-1 (E) Technical specification for the supply of axles for tractive and and trailing stock. (1987). In: International Union of Railways (UIC).
100. UIC 812-3 Technical specification for the supply of solid (monobloc) wheels in rolled non-alloy steel for tractive and trailing stock. (1984). In (pp. 55).
101. UIC 860-9ed. Technical specification for the supply of rails. (2008). In (pp. 27).
102. Un nouveau type d'aiguillage. (2014). Retrieved from <http://www.translille.com/spip.php?article39>
103. Wagonway. (2020). *wikipedia*. Retrieved from <https://www.en.wikipedia.org/wiki/Wagonway>
104. Weinstock, H. (1984). Wheel climb derailment criteria for evaluation of rail vehicle safety. *ASME Winter Annual Meeting, 84-WA/RT-1*, 7.
105. World Rail Network and Rail Systems. (2020). Retrieved from <https://www.transportgeography.org/contents/chapter5/rail-transportation-pipelines/world-rail-network-system/>
106. X'Pert MRD Versatile research & development XRD system. (2021). Retrieved from <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/xpert3-range/xpert3-mrd>
107. Xin, L., Markine, V., & Shevtsov, I. (2017). Analysis of the effect of repair welding/grinding on the performance of railway crossings using field measurements and finite element modeling. *RAIL AND RAPID TRANSIT*, 18. doi:10.1177/954409717693960

-
108. Y25 Bogie. (2019). Retrieved from http://www.eastrailway.com/a/PRODUCTS/Module_and_system/Bogie/Y25_bogie/2019/0720/314.html
 109. Zucarelli, T. A., Vieira, M. A., Filhoc, L. A. M., Reisb, D. A. P., & Reisb, L. (2016). *Failure analysis in railway wheels*. Paper presented at the XV Portuguese Conference on Fracture, Arcos, Portugal.
 110. Балановский, А. Е. (2011). *СИСТЕМА КОЛЕСО – РЕЛЬС* (Vol. 1). Иркутского государственного технического университета: Иркутского государственного технического университета.
 111. Бояркин, Е.-В. (2019). Анализ разрушения цельнокатаных колес в процессе эксплуатации. *Вестник СГУПС, Выпуск 17*, 10.
 112. ГОСТ Р 51685-2000, рельсы железнодорожные, Общие технические условия. (2001). In (pp. 23).
 113. Григорьев, А. В., & Лепов, В. В. (2018). Механизмы накопления повреждений и разрушения материала обода железнодорожного колеса при эксплуатации в условиях севера. 6.
 114. Захарова, С. М., & Гершмана, И. С. (2009). Повышение ресурсов бандажей. *ВНИИЖТ*.
 115. Лужнов, Ю. М. (2003). *Сцепление колес с рельсами (природа и закономерности)* (Интекст Ed.): Интекст.
 116. Скобло, Т., Сапожков, В., & Сидашенко, А. (2018). *ПРОИЗВОДСТВО ПОВЕРХНОСТНО-ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСОВ С НАГРЕВА ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ* (С. Т.С. Ed.). Харьков.
 117. Шаповалов Владимир Владимирович, Майба Игорь Альбертович, Вялов Сергей Алифтинович, Глазунов Дмитрий Владимирович, & Михайлович, Х. Х. (2009). Russia Patent No.