



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE
ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ DE
INGINERIE ELECTRICĂ



TEZĂ DE DOCTORAT

-REZUMAT-

STUDIUL REZISTENȚEI DE CONTACT AL CONECTORILOR DE CURENȚI SLABI DIN INDUSTRIA AUTOMOBILELOR SUPUȘI FACTORILOR DE ÎMBĂTRANIRE

Conducător de doctorat,

Prof.dr.ing. Laurențiu Marius DUMITRAN

Autor,

Ing. Gideon Gwanzuwang DANKAT

BUCUREȘTI

2023

CUPRINS

CAPITOL 1 – INTRODUCERE.....	4
CAPITOLUL 2 - ANALIZA LITERATURII	5
2.1. Contactele Electrice	5
2.1.1. Îmbătrânirea Contactelor Electrice	6
2.1.1.1. Mecanisme de Îmbătrânire a Contactelor Electrice	6
2.2. Rezistența de Contact.....	6
2.2.1. Interfață de contact.....	7
2.2.2. Măsurarea Rezistenței de Contact.....	7
CAPITOLUL 3 - ANALIZA NUMERICĂ A CONTACTELOR DE CURENȚI SLAB	8
3.1. Modelul I: Dezvoltarea Modelului.....	8
3.1.1. Modelul Geometric	8
3.1.2. Modelul Matematic	9
3.1.2.1. Problemă Electrică.....	9
3.1.2.2. Problema Termica.....	10
3.2. Modelul II: Dezvoltarea Modelului	10
3.2.1. Modelul Geometric	11
3.2.2. Modelul Matematic.....	11
3.3. Modelul III: Dezvoltarea modelului.....	12
3.3.1. Modelul Geometric	12
3.3.2. Modelul Matematic.....	12
3.4. Modelul IV: Dezvoltarea Modelului.....	13
3.4.1. Modelul Geometric	13
3.4.2. Modelul Matematic.....	13
CAPITOLUL 4 - CALCULUL ELECTRO-TERMIC A UNUI CONTACT DE CURENT SLAB	14
4.1. Modelul I (procedură și obiective).....	14
4.1.1. Rezultate	14
4.1.2. Discuție	15
4.2. Modelul II (procedură și obiective)	15
4.2.1. Rezultate	16
4.3. Analiza Multifizică a Punctelor de Contact	17
4.3.1. Rezultate	17
4.3.2. Discuție	19
CAPITOLUL 5 - CALCULUL ANALITIC ȘI NUMERIC AL REZISTENȚEI ELECTRICE ÎNTR- UN CONTACT METALIC MULTI-PUNCT DE CURENT SLAB.....	19
5.1. Modelul III (procedură și obiective)	19
5.1.1. Rezultate	20

5.1.2.	Influența îmbătrânirii asupra rezistenței electrice (modelul III)	21
5.1.2.1.	Rezultate	21
5.1.3.	Modelul III Simulare Electrotermică (Procedură și Obiective)	22
5.1.3.1.	Rezultate	23
5.1.4.	Discuție	24
5.2.	Modelul IV (Procedură și Obiective).....	24
5.2.1.	Rezultate	25
5.2.1.1.	Grosimea Punctului de Contact de 1 μm	25
5.2.1.2.	Grosimea Punctului de Contact de 10 μm	25
5.2.1.3.	Grosimea Punctului de Contact de 13 μm	26
5.2.1.4.	Soluție Analitică.....	27
5.2.2.	Efectul îmbătrânirii asupra rezistenței electrice (modelul IV)	27
5.2.2.1.	Rezultate	27
5.2.2.1.1.	Grosimea punctului de contact de 1 μm	27
5.2.2.1.2.	Grosimea punctului de contact de 10 μm	28
5.2.2.1.3.	Grosimea Punctului de Contact de 13 μm	28
5.2.3.	Modelul IV Simulare Electrotermică (Procedură și Obiective).....	29
5.2.3.1.	Rezultate	29
5.2.3.1.1.	Analiza Electrotermică (Grosimea Punctului de Contact de 1 μm).....	30
5.2.3.1.2.	Analiză Electrotermică (Grosimea Punctului de Contact de 10 μm).....	30
5.2.3.1.3.	Analiză Electrotermică (Grosimea Punctului de Contact de 13 μm).....	31
5.2.4.	Discuție	31
CAPITOLUL 6 - VALIDAREA EXPERIMENTALĂ A CALCULULUI REZISTENȚEI DE CONTACT		32
6.1.	Eșantioane	32
6.2.	Configurație Experimentală și Măsurători	33
6.3.	Rezultate Experimentale	34
6.3.1.	Eșantion de contact cu aliaj ZrCu - Depunere Puncte de 1 μm	34
6.3.2.	Eșantion de contact cu aliaj ZrCu - Depunere Puncte de 10 μm	36
6.3.3.	Eșantion de contact cu aliaj ZrCu - Depunere Puncte de 13 μm	37
6.4.	Discuție	39
CONCLUZIE GENERALĂ, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI LUCRĂRI VIITOARE		41
Concluzie Generală.....		41
Contribuții Originale.....		42
PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ		43
BIBLIOGRAFIE		44

CAPITOL 1 – INTRODUCERE

Cererea de vehicule sigure, ecologice și autonome este în creștere, motiv pentru care interesul producătorilor de automobile se îndreaptă către vehiculele electrice (EVs). Acest lucru a dus la o creștere a numărului de conectori din componența vehiculelor, unele având deja peste 300 de astfel de conectori. [1.1]

Această teză de doctorat își propune să descrie rezistența de contact a conexiunilor electrice deteriorate la funcționarea în curenți slabi, în conformitate cu standardul IEC-512-2-2a. Studiul implică dezvoltarea diferitelor modele de contact și analizarea proceselor de degradare a acestora folosind analiza numerică FEM în COMSOL Multiphysics, precum și influența diferitelor mecanisme de îmbătrânire, cum ar fi oxidarea, temperatura, forța de apăsare și a curentului asupra rezistenței acestora. Eșantioanele de contacte electrice sunt fabricate folosind metoda de depunere cu arc catodic, iar procesul de degradare este analizat printr-o metoda accelerată de îmbătrânire termică și determinarea rezistenței folosind o tehnică de măsurare cu patru sonde. Teza cuprinde 6 capitole, primele două capitole prezintă o documentare introductivă a importanței și rolului temei propuse, în timp ce capitolele 3 - 6 tratează descrierea și rezultatele studiilor numerice, analitice și experimentale efectuate pentru atingerea obiectivelor propuse.

Capitolul 1 prezintă un context introductiv al temei propuse, evidențiind importanța, scopul principal și structura tezei.

Capitolul 2 al tezei prezintă un studiu bibliografic a rezistenței de contact, un indicator cheie al îmbătrânirii contactelor electrice, oferind documentație aprofundată despre importanța, măsurarea și metodele analitice de determinare ale acesteia. Capitolul conține, de asemenea, informații despre contacte electrice și clasificările acestora, conectori auto și mecanismele care influențează îmbătrânirea lor.

Capitolul 3 prezintă partea introductivă a analizei numerice (analiza multifizică), începând cu introducerea și importanța studiilor numerice în domeniul cercetării, apoi descrierea și caracterizarea diferitelor modele dezvoltate pentru atingerea obiectivelor tezei. Au fost propuse în total patru modele numerice (Modele I - IV) dezvoltate în regim electrocinetic. Pentru fiecare model luat a fost prezentată dezvoltarea modelului, modelul geometric, materialele utilizate și modelul matematic aplicat.

Capitolul 4 se ocupă de calculul electrotermic multifizic al unui contact cu curent slab. Se utilizează două modele, denumite Model I și Model II. Acesta utilizează Modelul I și Modelul

II pentru a analiza impactul mecanismelor de îmbătrânire asupra contactelor electrice. Modelele constau în benzi de cupru conectate prin puncte de contact circulare. Capitolul examinează, de asemenea, zonele de contact folosind Modelul II, pentru a înțelege impactul îmbătrânirii asupra funcționării conectorului electric. Analiza începe cu problema electromagnetica și continuă cu problema termică, luând în considerare pierderile Joule.

Capitolul 5 analizează calculele numerice și analitice pentru rezistența de contact al conectorilor de curenți slabi cu mai multe puncte de contact utilizând celelalte două modele, denumite Model III și Model IV. Modelul III, constând în două discuri de cupru conectate prin mai multe puncte, a fost simulat numeric și comparat cu modelele analitice Holm și Greenwood. Modelul IV, constând din doi electrozi de cupru în contact prin mai multe puncte ZrCu cu grosimi diferite ale acestora (ST: 1 μm , 10 μm și 13 μm), a fost calculat, luând în considerare sarcina aplicată și comparând-o cu modelele analitice Lee și Drew. Rezultatele arată diferențele între modelele numerice și cele analitice, influența îmbătrânirii asupra rezistenței electrice, legătura dintre rezistența de contact și sarcina aplicată și influența temperaturii asupra modelelor de contact.

Capitolul 6 prezintă partea experimentală a tezei, care a fost realizată prin pregătirea unor eșantioane de contact bazate pe structura și caracteristicile Modelului IV prezentate în capitolele 3 și 5. Aceste eșantioane de contact permit calcularea rezistenței punctelor de contact în funcție de sarcina aplicată. Eșantioanele sunt formate din puncte ZrCu depuse pe un laminat placat cu cupru (CCL) cu diferite grosimi de depunere (DT), de 1 μm , 10 μm și 13 μm . Secțiunea finală a capitolului abordează variația rezistenței de contact în funcție de sarcina aplicată contactului pentru diferite grosimi de depunere a punctelor ZrCu, iar rezultatele au fost comparate cu cele ale modelului numeric Model IV pentru validarea acestuia.

CAPITOLUL 2 - ANALIZA LITERATURII

2.1. Contactele Electrice

Contactul electric este o element important din industria auto, care implică interacțiunea componentelor electrice și mecanice pentru a asigura fluxul sigur și neîntrerupt al curentului electric, facilitând transmisia de putere sau semnale. Cu toate acestea, diverși factori precum temperatura, umiditatea și vibrațiile mecanice pot afecta eficacitatea acestor conexiuni.

Conectorii auto sunt esențiali în producția de vehicule electrice (EV), conectând sistemele electrice și asigurând funcționarea fără probleme a acestora. Componenta acestor conectori

constă în două elemente: partea de contact, realizată din materiale precum cupru, aluminiu și alamă pentru o conductivitate ridicată, durabilitate, și rezistență la coroziune, și o carcasă din plastic pentru izolația acestora.

2.1.1. Îmbătrânirea Contactelor Electrice

Contactele electrice sunt esențiale în proiectarea și construcția sistemelor electrice, iar îmbătrânirea lor poate afecta în mod semnificativ funcționalitatea și fiabilitatea acestora. Factorii cum ar fi uzura mecanică, coroziunea și temperaturile ridicate pot provoca degradarea lor. În realitate fiabilitatea conexiunilor electrice este influențată de conductibilitatea zonelor de contact depinzând de diferiți factori de performanță și de proiectare, cum ar fi straturile de contact, materialele, geometria și topografia interfeței de contact [2.1].

2.1.1.1. Mecanisme de Îmbătrânire a Contactelor Electrice

Oxidarea: Este o reacție chimică sau electrochimică între o componentă metalică și mediul său înconjurător, ce are ca rezultat modificări care determină deteriorarea materialului, alterându-i proprietățile și funcționalitatea. [2.2]

Îmbătrânirea mecanică (prin frecare): Se referă la mișcarea sau vibrația repetitivă de intensitate mică ce poate apărea între două suprafețe de contact. Această mișcare poate determina frecări între cele două suprafețe, ducând la formarea de particule mici sau resturi care se pot acumula și influența conductivitatea electrică a contactului.

Îmbătrânirea termică: Se referă la o deteriorare progresivă a conectorilor electrice care apar în timp datorită expunerii la căldură. Atunci când contactele electrice sunt expuse la temperaturi ridicate, cum ar fi cele experimentate de regulă în industria automobilelor, mai multe mecanisme pot contribui la îmbătrânirea lor.

2.2. Rezistența de Contact

Rezistența de contact a contactelor electrice este influențată de diverși factori, precum efectele termice, compoziția materialului, sarcina/presiunea, condițiile atmosferice, curentul, și apare la interfața sau punctul de contact a două conductoare, provocând scăderi de tensiune și căldură localizată, ducând la probleme termice. Conceptul de bază al rezistenței de contact este ilustrat în Fig. 2.1.

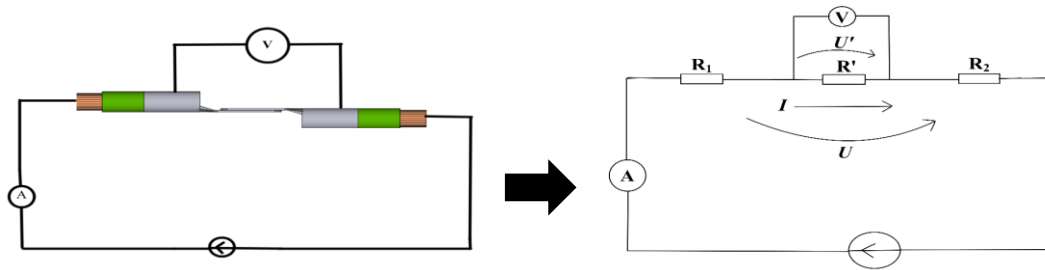


Fig. 2.1. Definirea rezistenței de contact.

Din Fig 2.1. se observa o scădere a tensiunii de-a lungul părții conductoare a conectorului (adică, $U \rightarrow U' < U$). Acest lucru se întâmplă datorită transformării energiei sub formă de tensiune în alte forme de energie, cum ar fi căldură, lumină, etc..

2.2.1. Interfață de contact

Suprafețele solide sunt grosiere, constând în asperități cu forme și caracteristici geometrice diferite. Contactul dintre entități are loc în anumite puncte din cauza neregulilor structurale, rezultând o porțiune minusculă a zonei de contact vizibile, așa cum este demonstrat în Fig. 2.2.

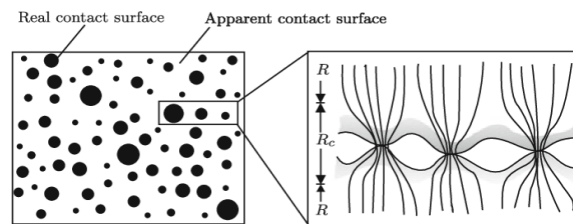


Fig. 2.2. Diagramă tipică a interfeței electrice. [2.3]

2.2.2. Măsurarea Rezistenței de Contact

Rezistența de contact poate fi determinată folosind o varietate de tehnici. De obicei, aceste estimări sunt fie determinate de un model al suprafeței de contact (prin simulări numerice), de metode analitice sau de măsurători experimentale precise. În această teză, toate cele trei metode au fost utilizate pentru a evalua rezistența de contact. Modelul analitic Holms (1) [2.4] și Greenwoods (2) [2.5] a fost utilizat pentru calcule analitice, în timp ce FEM (în COMSOL Multiphysics) și tehnica de măsurare cu patru sonde au fost folosite pentru procedurile numerice și experimentale.

$$R_c = \frac{\rho}{2a} \quad (1)$$

$$R_{G1} = \frac{\rho}{2 \sum a_i} + \frac{\rho}{\pi n^2} \sum_{i \neq j} \frac{1}{s_{ij}}. \quad (2)$$

CAPITOLUL 3 - ANALIZA NUMERICĂ A CONTACTELOR DE CURENȚI SLAB

În acest capitol, vor fi introduse diverse modele de contact electric simplificate pentru a examina procesul de deteriorare utilizând o analiză Multifizică în COMSOL Multiphysics folosind metoda elementelor finite (FEM). Din motive de simplificare, s-au presupus că punctele (*a*-spots) sunt circulare. Analiza implică determinarea temperaturii, conductivității electrice a suprafețelor de contact și a densității de volum a pierderilor electrice folosind o tehnică iterativă. Conductivitatea electrică a fost calculată secvențial pentru fiecare valoare de temperatură la fiecare pas până când noua valoare a temperaturii determinată se potrivește cu valoarea anterioară.

3.1. Modelul I: Dezvoltarea Modelului

Analiza se concentrează pe un contact electric pe bază de cupru suspendat într-o cutie umplută cu aer, estimând distribuția câmpului electromagnetic și a temperaturii folosind metoda elementelor finite (FEM) cu densitate scăzută de curent continuu. A fost utilizată o simulare 3D cu elemente finite cuplate termic-electrice pentru a examinarea schimbărilor de temperatură, dar pentru simplificare s-a analizat doar partea inferioară a suprafeței de contact cum se observă în Fig 3.1.

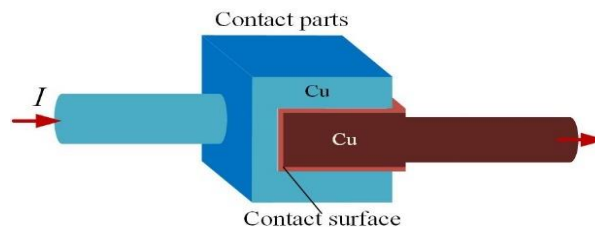


Fig. 3.1. Vedere schematică a contactului. [3.1]

3.1.1. Modelul Geometric

Analiza se concentrează pe contactul dintre două benzi metalice, ce se ating în 5 puncte neuniforme pe suprafața cărora este un strat de oxid, cu valori variabile ale conductivității electrice. Asperitățile (punctele de contact) sunt circulare și au grosimi variind de la 10 μm la 50 μm . [3.1]

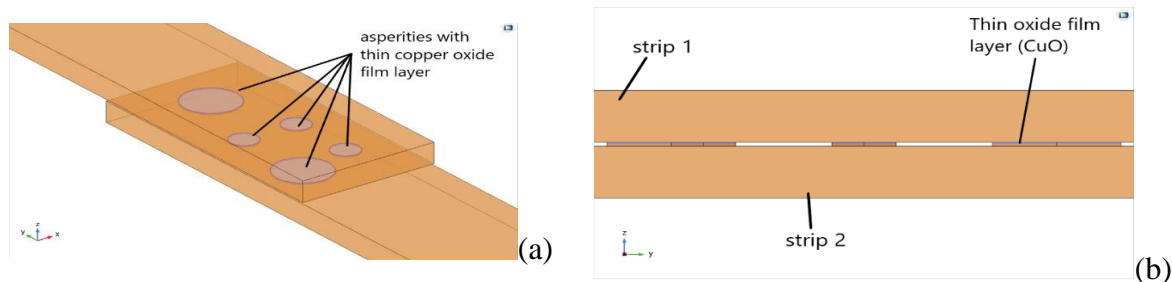


Fig. 3.2. Model geometric (Model I): (a) punctele de contact, (b) stratul de oxid. [3.1]

Tabelul 3.1 prezintă proprietățile materialelor utilizate pentru analiza numerică a Modelului I.

Tabelul 3.1. Proprietățile cuprului și oxidului – materiale utilizate pentru Modelul I [3.2, 3.3]

<i>Proprietate</i>	<i>Expresie</i>		<i>Unit</i>
	Cupru	Oxid	
Conductivitate electrică	$5.96 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^3$	[S/m]
Conductivitate termică	400	33	[(W/(m·K))]
Capacitate termică la presiune constantă	385	196	[J/(kg·K)]
Coefficient de temperatură al rezistivității	$3.9 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$	[1/K]

3.1.2. Modelul Matematic

Problema cuplată electromagnetic-termic este analizată în regim electrocinetic staționar ca parte a regimului multifizic.

3.1.2.1. Problemă Electrică

Problema electromagnetică, ce presupune un regim electrocinetic staționar, determină distribuția unui curent electric de densitate \mathbf{J} pe un contact folosind trei ecuații esențiale: legea inducției electromagnetice (3), legea conducției electrice (4) și legea conservării sarcinii electrice (5). [3.1]

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0, \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \quad (4)$$

$$\text{div } \mathbf{J} = 0, \quad (5)$$

unde σ [S/m] reprezintă conductivitatea electrică și \mathbf{E} [V/m] reprezintă intensitatea câmpului electric, se presupune că mediile sunt omogene și izotrope, adică nu se modifică la schimbarea temperaturii. Ca rezultat al potențialului electric V , puterea câmpului electric \mathbf{E} poate fi evaluată:

$$\mathbf{E} = -\text{grad}V. \quad (6)$$

Condițiile de frontieră sunt următoarele:

Continuitate:

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_2) = 0, \quad (7)$$

unde \mathbf{J}_1 și \mathbf{J}_2 sunt desnițiile de curent pe suprafețele de contact ale celor două benzi de cupru. Această condiție asigură conservarea și continuitatea componentelor electrice la trecerea dintre două medii diferite.

Izolație electrică:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (8)$$

Densitatea de volum a pierderilor electrice (pierderile Joule) cauzată de curentul electric la trecerea între benzile de cupru prin interfața de contact este determinată folosind legea transformării energiei:

$$P = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \sigma E^2. \quad (9)$$

3.1.2.2. Problema Termica

Problema termică se referă la încălzirea contactelor datorată disipării rezistive, definită de temperatura ambiantă T_0 , și este reprezentată de următoarea formulă:

$$Q = \rho C_p \cdot dT/dt + \nabla \Psi, \quad (10)$$

unde ρ [kg/m³] reprezintă densitatea, C_p [J/(kg·K)] reprezintă capacitatea termică specifică, Q este sursa de caldură și este echivalent cu densitatea volumică a pierderilor electrice, iar ψ [W/m²] reprezintă fluxul de căldură determinat prin legea Fourier:

$$\Psi = -\lambda \cdot \nabla T, \quad (11)$$

în care presupunem conductivitatea termică λ [W/(mK)] invariabilă (nu variază cu temperatura). Condiția inițială a ecuației (10) este $T = T_0$ în toate punctele domeniului de calcul. În plus, criteriile de continuitate (flux termic continuu) sunt impuse la fiecare frontiera care separă cele două zone distincte (subdomenii) j și k :

$$\mathbf{n} \cdot (\lambda_j \cdot \nabla T - \lambda_k \cdot \nabla T) = 0, \quad (12)$$

unde λ_j și λ_k reprezintă conductivitățile termice asociate subdomeniilor j , respectiv k . Convecția și radiația nu au fost luate în considerare pentru a minimiza calculul și durata simulării. [3.1]

3.2. Modelul II: Dezvoltarea Modelului

Modelul II are o geometrie similară cu cea a modelului I, cu un strat discontinuu a suprafeței de contact având o conductivitate electrică mai mică decât a celor două benzi componente. Pentru analiza numerică, se utilizează doar porțiunea inferioară a suprafeței de contact etichetată cu "2" în Fig 3.3. Acest model constă în două benzi de cupru suprapuse,

având 12 puncte circulare distribuite uniform pe suprafața de contact, față de cele 5 puncte circulare ale modelului I.

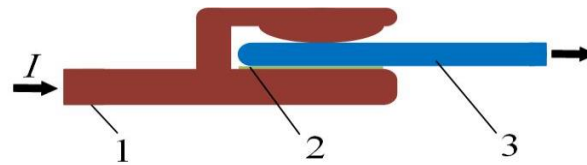


Fig. 3.3. Diagrama unui contact electric: (1) și (3) componentele contactului și (2) stratul discontinuu a suprafeței de contact. [3.4]

3.2.1. Modelul Geometric

Benzile de cupru au o lungime de 10 mm, o lățime de 1 mm și o înălțime de 0,2 mm, cu o suprapunere de 3 mm și sunt conectate prin cele douăsprezece asperități (puncte de contact) pe suprafața cărora se afla stratul subțire de oxid ca în Fig. 3.4. [3.4]

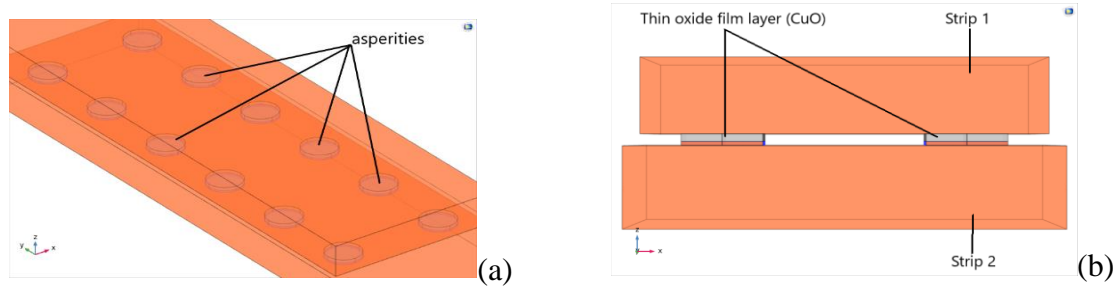


Fig. 3.4. Geometria celor două benzi de cupru suprapuse (modelul II): (a) cele douăsprezece puncte de contact, (b) stratul subțire de oxid din zona de contact. [3.4]

Similar cu materialele aplicate modelului I, s-a folosit cupru pentru cele două benzi și oxid de Cu pentru cele 12 asperități (vezi Tabelul 3.1).

3.2.2. Modelul Matematic

Modelul II, rezolvat în regim electrocinetic, presupune conductivitatea electrică a stratului de oxid pe suprafața de contact (σ_o) variabilă în funcție de temperatura $\sigma_o(T)$. Acest lucru diferă de modelul I, în care s-a considerat conductivitatea electrică invariabilă. Dependența dintre σ_o și temperatura oxidului a fost estimată cu ajutorul următoarei expresii:

$$\sigma_o(T) = \{\rho_0[1 + \alpha (T-T_0)]\}^{-1}, \quad (13)$$

unde T este temperatura în $^{\circ}\text{C}$, $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$, $\rho_0 = 1 \cdot 10^{-3} \Omega\text{m}$, iar coeficientul de temperatură al rezistivității este notat cu α ($\alpha = 3.90 \cdot 10^{-3}$).

3.3. Modelul III: Dezvoltarea modelului

Modelul numeric în acest caz are o formă simplificată, constând în două discuri de cupru conectate prin mai multe puncte de contact ca în Fig. 3.5. Vom presupune că punctele circulare sunt dispersate uniform pe întreaga suprafață. Spre deosebire de modelele I și II, modelul III are o formă de disc și un strat izolator de polietilenă pentru o analiză mai precisă a punctelor de contact.

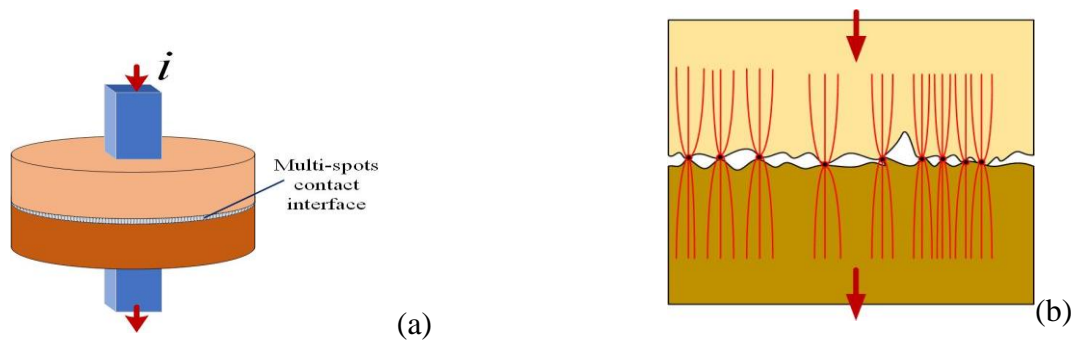


Fig. 3.5. Diagramă a montajului de contact: (a) contact între discuri de cupru; (b) linii de curent care se constrâng la trecerea prin punctele de contact. [3.5]

3.3.1. Modelul Geometric

Studiul a examinat suprafața de contact dintre două discuri de cupru, de raza 5 mm și grosime 1 mm, cu 28 de puncte circulare de contact având o rază de 0,2 mm. Limitarea trecerii curentului în afara punctelor de contact s-a realizat cu un strat izolator de 30 μm grosime. [3.5]

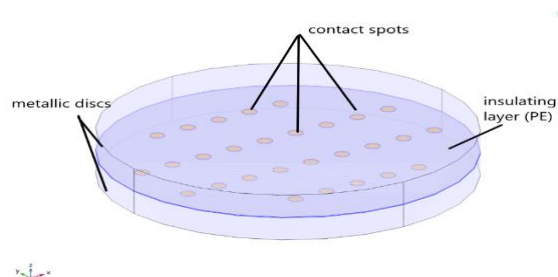


Fig. 3.6. Modelul geometric (modelul III) care prezintă discurile de cupru, punctele de contact și stratul izolator. [3.5]

3.3.2. Modelul Matematic

Modelul III, rezolvat în regim electrocinetic, urmează ecuațiile pentru câmpurile electrice și termice prezentate la modelul I, cu conductivitate termică și electrică constantă și neglijând mecanismele de convecție și radiație.

3.4. Modelul IV: Dezvoltarea Modelului

Modelul numeric IV descrie doi electrozi de cupru care interacționează prin mai multe puncte ZrCu, cu dimensiuni egale și distribuite uniform. Deși pot exista limitări în ceea ce privește performanțele calculului numeric, punctele de ZrCu au fost modelate cu dimensiuni rezonabile, permițând efectuarea de studii experimentale pentru validarea modelului.

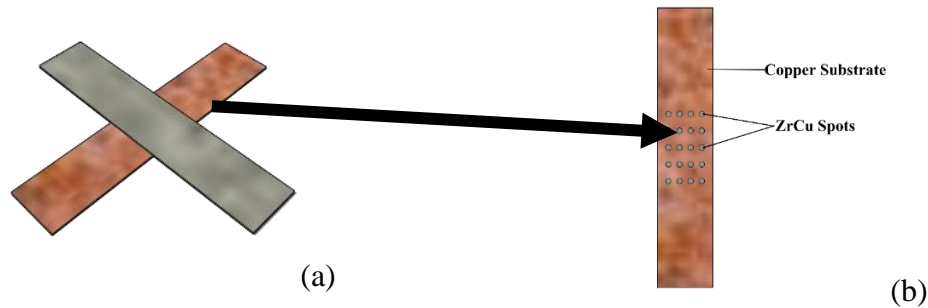


Fig. 3.7. Vedere schematică a configurației contactelor electrice: (a) substratul de cupru, (b) punctele de ZrCu pe suprafață de contact

3.4.1. Modelul Geometric

Modelul constă în doi electrozi de 55 mm lungime și 17 mm lățime conectați prin 36 de puncte circulare din ZrCu de raza 0,5 mm. Au fost analizate 3 cazuri diferite în care grosimea acestor puncte s-a considerat 1 μm, 10 μm, respectiv 13 μm (Fig. 3.8).



Fig. 3.8. Modelul geometric (modelul IV) care arată: (a) electrozii de cupru, (b) punctele de ZrCu pe suprafața de contact.

3.4.2. Modelul Matematic

Modelul multifizic IV rezolvă probleme termice, mecanice și electromagnetice în regim electrocinetic staționar, folosind corelațiile Cooper-Mikic-Yovanovich pentru contactele electrice, ignorând mecanismele de radiație și convecție. [3.5-3.7]

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_1 = -h_c (V_1 - V_2), \quad (14)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_2 = -h_c (V_2 - V_1), \quad (15)$$

unde J_1 și J_2 reprezintă desnitațiile de curent pe suprafața electrodului superior și punctele de ZrCu, h_c semnifică relația Cooper-Mikic-Yovanovich care leagă forța de apăsare a contactului și asperitățile de pe suprafața acestuia, și este dată de următoarea relație:

$$h_c = 1.25\sigma_{\text{contact}}\{(m_{\text{asp}} / \sigma_{\text{asp}}) \cdot (p / H_c)^{0.95}\} \quad (16)$$

unde m_{asp} reprezintă panta medie a asperităților, σ_{asp} reprezintă înălțimea medie a rugozității suprafeței, p reprezintă presiunea aplicată contactului, and H_c reprezintă microduritatea materialului.

CAPITOLUL 4 - CALCULUL ELECTRO-TERMIC A UNUI CONTACT DE CURENT SLAB

Acest capitol examinează interacțiunea dintre caracteristicile electrice și termice în modelele de contact, cu scopul de a calcula starea electro-termică a unui contact de curent slab folosind tehnica numerică FEM și software-ul COMSOL Multiphysics.

4.1. Modelul I (procedură și obiective)

Studiul investighează modelul de contact simplificat I, analizând schimbările de temperatură în zonele de contact pe măsură ce grosimea și conductivitatea straturilor de oxid variază.

4.1.1. Rezultate

Fig. 4.1 prezintă distribuția temperaturii la un curent injectat de 500 mA și conductivitățile termice ale benzilor de cupru, ale stratului de oxid și ale aerului de 400 W/(m·K), 33 W/(m·K), respectiv 0,0252 W/(m·K). Din aceasta se observă că temperatura de vârf este de 28°C din cauza constrângerii căilor de curent și a straturilor de oxid izolatoare.

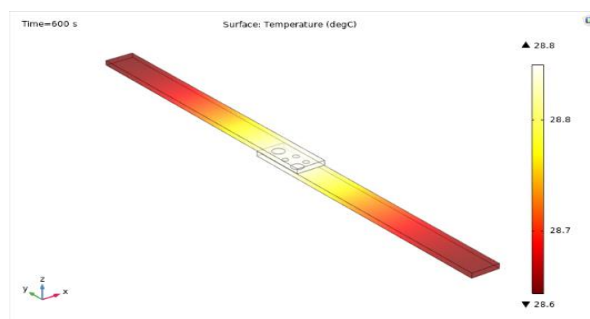


Fig. 4.1. Distribuția temperaturii de suprafață la benzile de cupru și zona de contact.

În Fig. 4.2 este reprezentată variația temperaturii pentru diferite valori ale conductivității electrice ale stratului de oxid la o valoare constantă a curentului egală cu 100 mA (a) și variația temperaturii pentru diferite valori ale curentului injectat la o valoare constantă a conductivității electrice egală cu 10^3 S/m (b). [4.1]

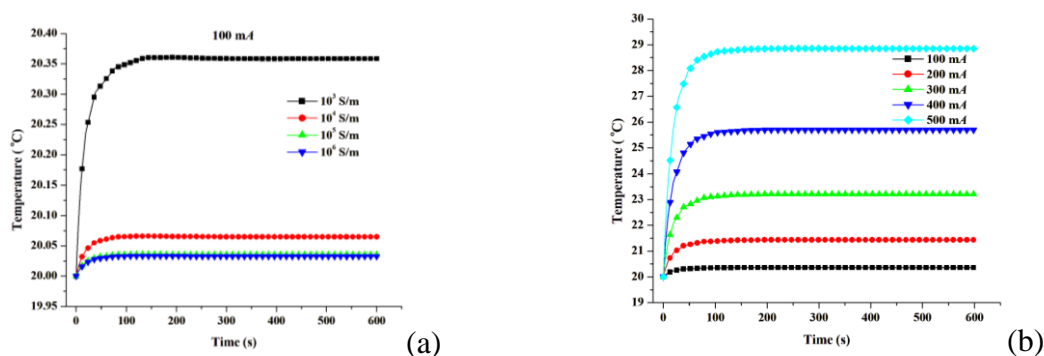


Fig. 4.2. Modificări ale temperaturii în timp: (a) pentru diferite valori ale conductivității electrice ale stratului de oxid; (b) pentru diferite valori ale curentului injectat.

Pentru $\sigma_O = 10^3$ S/m și $\sigma_{Cu} = 5.96 \cdot 10^7$ S/m, Fig. 4.3 ilustrează modificarea temperaturii de contact pe măsură ce grosimea stratului de oxid la nivelul suprafeței crește.

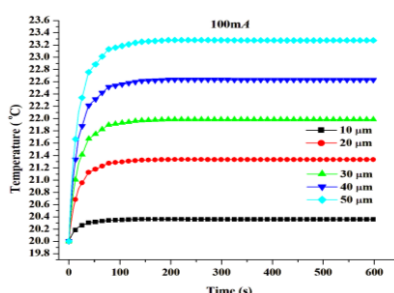


Fig. 4.3. Variația temperaturii în funcție de timp pentru diferite valori ale grosimii stratului de oxid la nivelul suprafeței de contact pentru $\sigma_{Cu} = 5.96 \cdot 10^7$ S/m and $\sigma_O = 10^3$ S/m.

4.1.2. Discuție

Se propune un model electric simplificat cu asperități microscopice pentru investigarea numerică a variației de temperatură în conexiunile electrice de curenți slabi influențate de oxidare. Rezultatele au arătat că temperatura crește odată cu curentul injectat și grosimea stratului de oxid, accelerând degradarea contactelor electrice în timp.

4.2. Modelul II (procedură și obiective)

Procedura de calcul electrotermic pentru modelul II implică simulări pentru diferite grosimi ale straturilor de oxid și analiza multifizică a punctelor de pe suprafața de contact, concentrându-se pe degradarea stratului de oxid izolant.

4.2.1. Rezultate

Fig. 4.4 prezintă temperatura calculată pentru contactul electric nedegradat. Se observă că temperatura maximă atinsă în acest caz este de 20,8°C. [4.2]

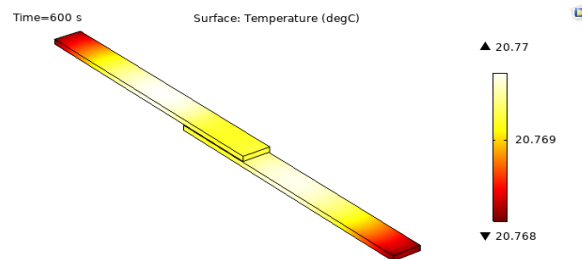


Fig. 4.4. Distribuția temperaturii benzii de cupru pentru un contact neîmbătrânit, fără prezența straturilor de oxid pe suprafața de contact.

Fig. 4.5 arată că un contact deteriorat cu un strat de oxid de 20 μm grosime în zona de contact are o temperatură maximă de 54,3 °C, ceea ce duce la creșterea rezistenței electrice și la o îmbătrânire accelerată a contactului. [4.2]

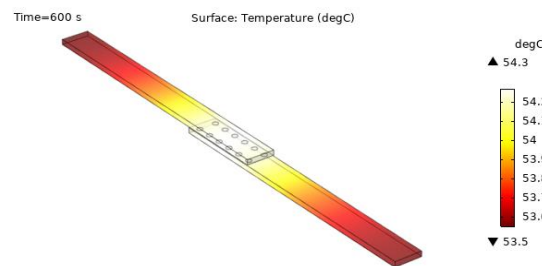


Fig. 4.5. Distribuția temperaturii benzii de cupru având un strat subțire de oxid pe suprafața de contact.

Fig. 4.6. ilustrează modificările de temperatură pe măsură ce crește stratul de oxid pe suprafața de contact pentru un curent de 200 mA (a) și pe măsură ce crește curentul aplicat pentru o grosime a stratului de oxid de 20 μm (b). [4.2]

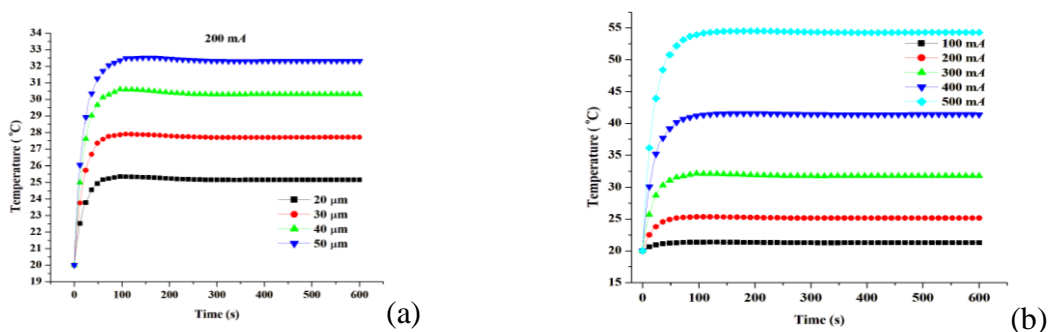


Fig. 4.6. Modificări de temperatură la interfața dintre benzile de cupru suprapuse: (a) pentru diferite grosimi ale stratului de oxid; (b) pentru diferite valori ale curentului aplicat.

Fig. 4.7 ilustrează variația în funcție de temperatură a conductivității electrice a stratului de oxid situat în punctul de contact. Oxizii materialelor chimice sunt de obicei semiconductori, dar în acest caz stratul de oxid de pe suprafață este considerat un produs de îmbătrânire datorită reacțiilor chimice care reduc conductivitatea electrică de contact.

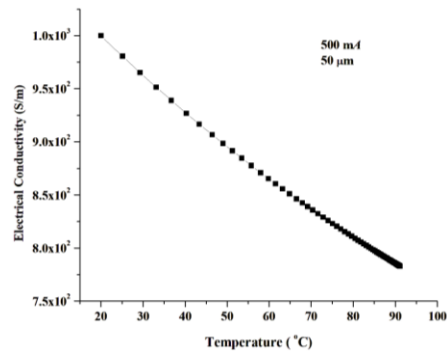


Fig. 4.7. Variații ale conductivității electrice a stratului de oxid de pe suprafața de contact în funcție de temperatură [calculate cu ajutorul ecuației (13)].

4.3. Analiza Multifizică a Punctelor de Contact

S-au realizat o serie de simulări pentru o analiză multifizică a punctelor de contact, luând în considerare modelul II cu 12 puncte circulare acoperite de un strat discontinuu de oxid. Straturile de oxid au avut o grosime de 20 μm și li s-au atribuit valori diferite ale conductivității electrice. Toate simulările au fost efectuate la un curent aplicat de 500 mA.

4.3.1. Rezultate

Fig. 4.8 prezintă distribuția temperaturii de 54,3 °C în punctele de contact de pe suprafața benzii de cupru, unde toate cele 12 straturi de oxid de la nivelul punctelor au conductivitatea electrică $\sigma = 1 \cdot 10^3$ S/m.

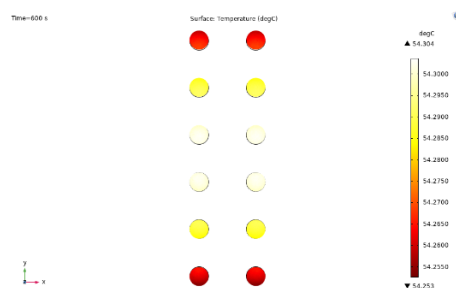


Fig. 4.8. Temperatura de suprafață a punctelor de contact la interfață (pentru $\sigma = 1 \cdot 10^3$ S/m la nivelul celor 12 puncte).

Vom considera cazul în care 3 puncte au conductivitatea electrică $1 \cdot 10^{-4}$ S/m, mult mai mică decât a celorlate 9 puncte de contact stabilite la $1 \cdot 10^3$ S/m. În urma modificărilor se

observă, conform Fig. 4.9a, că temperatura este concentrată pe punctele de pe suprafața de contact ajungând la valori de aproximativ 66 °C, dar fără variații semnificaive între cele 12 puncte deși conductivitatea electrică este diferită pentru 3 dintre acestea. Concentrația temperaturii pe suprafața de contact poate fi observată și în Fig. 4.9b, reprezentată printr-un grafic 3D al distribuției de temperatură pentru întregul mediu, de la cutia umplută cu aer până la suprafața contactului. În acest tip de reprezentare diferența între suprafața de contact și restul mediului este mult mai vizibilă, temperaturile variind de la 20 °C la 66 °C, iar distribuția temperaturii la nivelul punctelor este evidențiată, 3 dintre acestea având o suprafață plană din cauza rezistenței mai mari și a densității scăzute de curent.

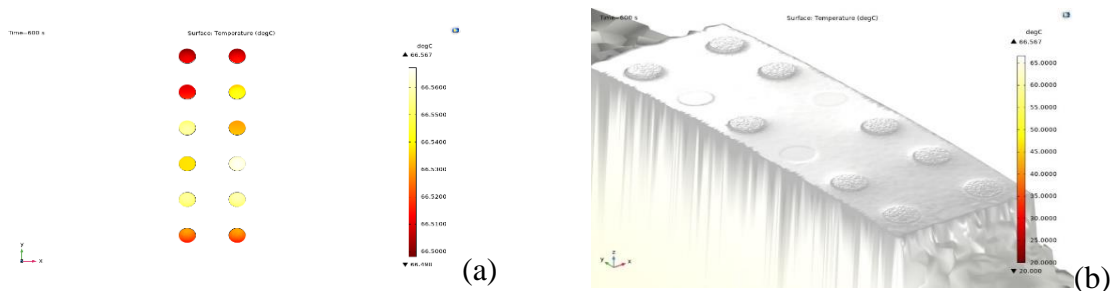


Fig. 4.9. Distribuția temperaturii: a) suprafața punctelor de contact b) graficul 3D la nivelul punctelor de contact (3 puncte de contact cu $\sigma = 1 \cdot 10^{-4}$ S/m și 9 puncte de contact cu $\sigma = 1 \cdot 10^3$ S/m).

Fig. 4.10 prezintă variația temperaturii la modificarea numărului punctelor de contact ce au o valoare mai mică a conductivității electrice, egală cu $1 \cdot 10^{-4}$ S/m. Se observă că temperatura de suprafață crește odată cu numărul punctelor ce au conductivitate redusă.

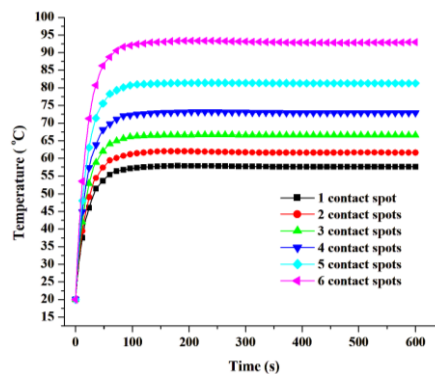


Fig. 4.10. Variația temperaturii benzii de cupru pentru diferite valori ale conductivității electrice a stratului de oxid de pe suprafața contactului.

În scenariul cel mai defavorabil, în care 10 din cele 12 puncte de contact de pe suprafață au o valoare mai mică a conductivității electrice, egală cu $1 \cdot 10^{-4}$ S/m, Fig. 4.11a) și b) arată o

temperatură maximă de 307 °C. O astfel de temperatură ridicată favorizează deteriorarea și, în cele din urmă, duce la ruperea contactului electric. În graficul 3D se observă că punctele cu o conductivitate de $1 \cdot 10^3$ S/m sunt mai ridicate reprezentând o valoare mai mare a temperaturii.

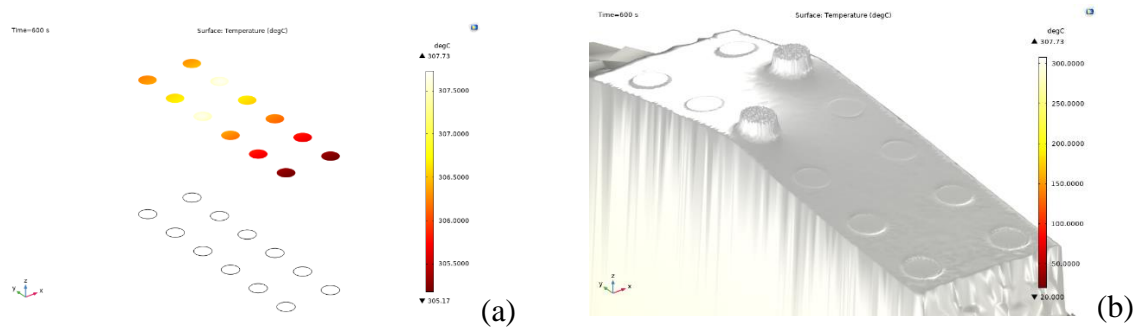


Fig. 4.11. Distribuția temperaturii la: (a) zona de contact a benzilor de cupru, (b) graficul 3D la nivelul punctelor de contact.

4.3.2. Discuție

Un studiu privind impactul îmbătrânirii asupra contactelor de curenți slabi care utilizează benzi de cupru a arătat că mecanismele de îmbătrânire, cum ar fi oxizii, contribuie la degradare și o creștere semnificativă a temperaturii la nivelul acestora. Conductivitatea electrică scade odată cu temperatura, ceea ce indică o rezistență sporită. Valorile de temperatură ridicată sunt problematice, deoarece pot accelera degradarea și pot provoca izbucniri de incendiu.

CAPITOLUL 5 - CALCULUL ANALITIC ȘI NUMERIC AL REZISTENȚEI ELECTRICE ÎNTR-UN CONTACT METALIC MULTI-PUNCT DE CURENȚ SLAB

Acest capitol studiază calculul rezistenței electrice în contactele de curenți slabi folosind metode analitice și numerice. Se discută impactul rezistenței asupra degradării contactelor și instrumentele utilizate atât pentru calculele analitice, cât și pentru cele numerice.

5.1. Modelul III (procedură și obiective)

Modelul III constă în discuri metalice din cupru cu multiple puncte de contact cărora le-a fost aplicat un curent continuu de 200 mA, iar distribuția câmpului electromagnetic a fost estimată cu ajutorul metodei FEM în COMSOL Multiphysics. Rezistența de contact a fost evaluată folosind căderea de tensiune între punctele de contact. Modelele analitice au fost

comparate cu modelele numerice pentru raze ale punctelor de contact cuprinse între 0,1 mm și 0,5 mm. [5.1]

5.1.1. Rezultate

Fig 5.1 prezintă tensiunea estimată pentru un curent injectat de 200 mA ($J = 2,546 \cdot 10^{-3} \text{ A/mm}^2$), discurile de cupru și punctele de contact având o rezistivitate $\rho_{\text{Cu}} = \rho_{\text{Cs}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$. Tensiunea de vârf măsurată este de aproximativ 0,4 μV .

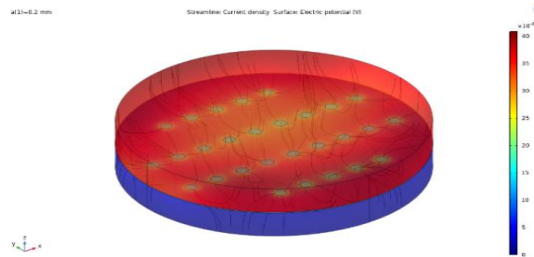


Fig. 5.1. Tensiunea calculată pentru un curent aplicat de 200 mA.

În fig 5.2 este reprezentată căderea de tensiune pentru diferite raze ale punctelor de contact ($a = 0,1 \text{ mm} - 0,5 \text{ mm}$). [5.1]

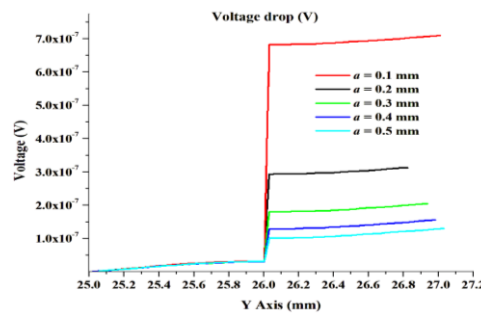


Fig. 5.2. Căderea de tensiune pentru diferiți parametri de rază a punctului de contact ($a = 0.1 \text{ mm} / 0.5 \text{ mm}$).

Datele privind rezistența de contact, estimate cu ajutorul ecuațiilor lui Greenwood și Holm, și valorile simulării numerice sunt prezentate în fig 5.3. Rezistența de contact scade pe măsură ce raza punctului de contact crește în toate cele trei scenarii. [5.2]

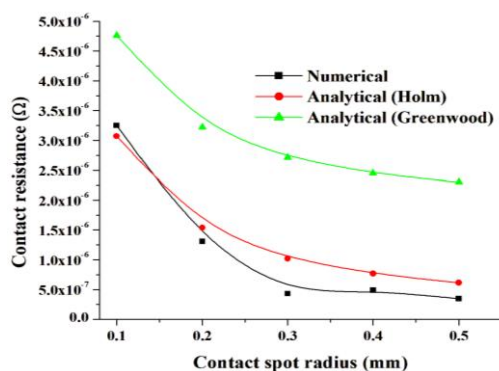


Fig. 5.3. Calculul rezistenței de contact cu date analitice de la Holm (●) și Greenwood (▲) și analiza numerică (■) pentru $\rho_{Cu} = \rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$.

5.1.2. Influența îmbătrânirii asupra rezistenței electrice (modelul III)

Pentru a investiga efectul îmbătrânirii asupra rezistenței electrice, s-a considerat că punctele de contact circulare ale modelului III au o rezistivitate mai mare decât cea a celor două discuri metalice de cupru, iar rezistența electrică a fost calculată analitic (modelul Holm și Greenwood) și numeric folosind metoda FEM în COMSOL Multiphysics.

5.1.2.1. Rezultate

În figura 5.4, două subfiguri (a) și (b) descriu rezistența de contact estimată pentru diferite valori ale rezistivității punctului de contact, $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{-6} \Omega m$ and $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{-4} \Omega m$, menținând constantă rezistivitatea discului de cupru, $\rho_{Cu} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega m$. [5.2]

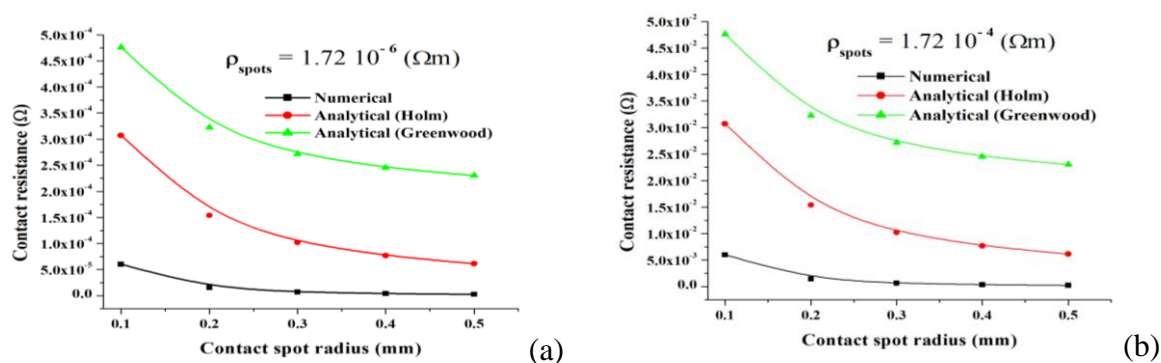


Fig. 5.4. Rezistența de contact afișând parametrii analitici ai modelelor Holm și Greenwood și valorile calculate numeric pentru $\rho_{Cu} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ and (a) $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$; (b) $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot m$.

Datele prezentate în Fig. 5.5 prezintă rezistența de contact calculată folosind rezistivitatea discurilor de cupru de $\rho_{Cu} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega m$ și rezistivitatea punctelor de contact de (a) $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^2 \Omega m$ and (b) $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^4 \Omega m$. [5.2]

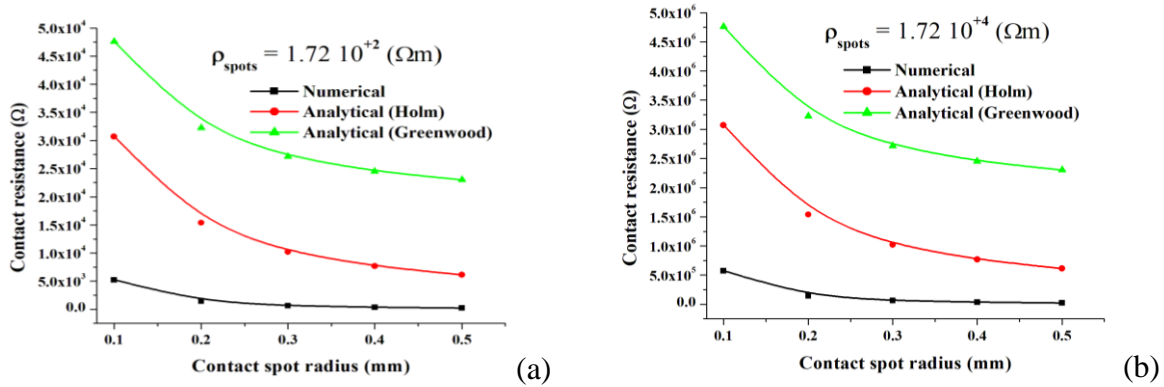


Fig. 5.5. Parametrii rezistenței de contact pentru teoriile Holm și Greenwood și calculele numerice pentru $\rho_{Cu} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ și: (a) $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{+2} \Omega \cdot m$; (b) $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{+4} \Omega \cdot m$.

Datele privind rezistența de contact obținute numai prin calcul numeric sunt prezentate în Fig. 5.6. Studiul a presupus o rezistivitate constantă de $\rho_{Cu} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega m$ pentru discurile de cupru, în timp ce cele 28 de puncte de contact aveau rezistivități de $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{-6} \Omega m$ (■), $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{-4} \Omega m$ (●), și $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot m$ (▲). În plus, studiul a examinat scenariul în care cele 28 de puncte de contact aveau rezistivități cuprinse între $1.72 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ to $1.72 \cdot 10^{+6} \Omega \cdot m$ (▼). [5.2]

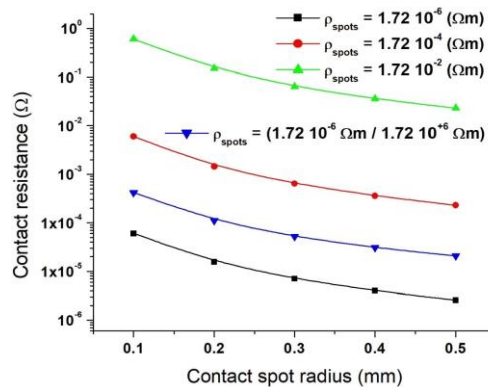


Fig. 5.6. Parametrii rezistenței de contact pentru modelul numeric obținuți pentru $\rho_{Cu} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega m$ cu $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{-6} \Omega m$; $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{-4} \Omega m$; $\rho_{Cs} = 1.72 \cdot 10^{-2} \Omega m$, și $\rho_{Cs} = (1.72 \cdot 10^{-6} \Omega m / 1.72 \cdot 10^{+6} \Omega m)$.

5.1.3. Modelul III Simulare Electrotermică (Procedură și Obiective)

Analiza termică a modelului III a fost efectuată cu ajutorul metodei FEM în COMSOL Multiphysics, concentrându-se pe caracteristicile materialelor în punctele de contact. Datorită naturii analitice a ecuațiilor lui Holm și Greenwood și a dificultății unei analize termice precise, această secțiune se concentrează pe rezistența de contact calculată numeric în Fig. 5.3.

5.1.3.1. Rezultate

Distribuția în regim staționar a temperaturii corespunzătoare modelului de contact este afișată în Fig. 5.7 pentru un curent de 200-mA, temperatura inițială $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, raza punctelor de contact $a = 0.1\text{ mm}$, $\rho_{\text{PE}} = 1 \cdot 10^{+17}\ \Omega\text{m}$, $\rho_{\text{Cu_disk}} = 1.72 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$, și 28 de puncte de contact cu o rezistivitate de (a) $\rho_{\text{Cu_spots}} = 1.72 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$ and (b) $\rho_{\text{Cu_spots}} = 1 \cdot 10^{-3}\ \Omega\text{m}$.

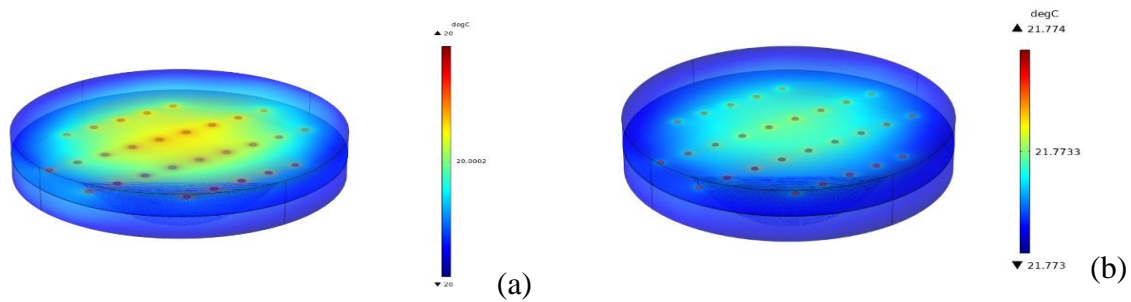


Fig. 5.7. Distribuția temperaturii $\rho_{\text{Cu_disk}} = 1.72 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$ și 28 de puncte de contact cu (a) $\rho_{\text{Cu_spots}} = 1.72 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$; (b) $\rho_{\text{Cu_spots}} = 1.72 \cdot 10^{-3}\ \Omega\text{m}$.

Intervalul de temperatură în stare stabilă al modelului de contact este afișat în Fig. 5.8 pentru un curent injectat de 200-mA, $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_{\text{PE}} = 1 \cdot 10^{+17}\ \Omega\text{m}$, $\rho_{\text{Cu_disk}} = 1.72 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$, $a = 0.1\text{ mm}$ și 3 puncte de contact cu o rezistivitate de (a) $\rho_{\text{Cu_spots}} = 1 \cdot 10^{-3}\ \Omega\text{m}$ and (b) ($1 \cdot 10^{-1}\ \Omega\text{m}$, $1 \cdot 10^{-3}\ \Omega\text{m}$, și $1 \cdot 10^{-2}\ \Omega\text{m}$).

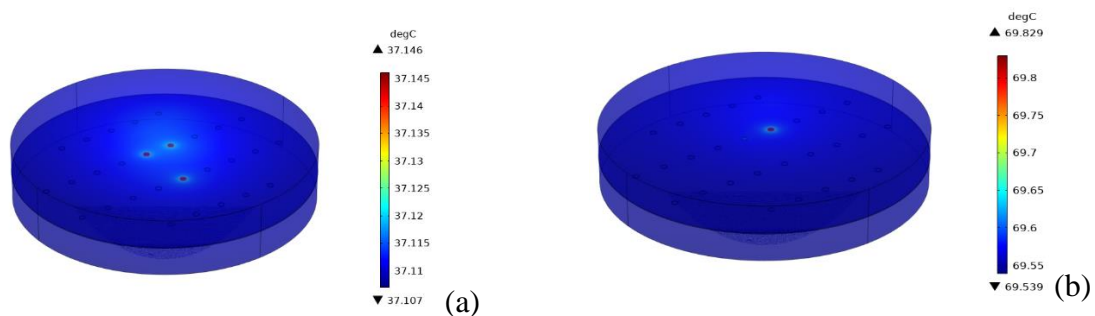


Fig. 5.8. Distribuția temperaturii pentru $\rho_{\text{Cu_disk}} = 1.72 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$ și 3 puncte de contact cu (a) $\rho_{\text{Cu_spots}} = 1 \cdot 10^{-3}\ \Omega\text{m}$; (b) ($\rho_{\text{Cu_spots}1} = 1 \cdot 10^{-1}\ \Omega\text{m}$, $\rho_{\text{Cu_spots}2} = 1 \cdot 10^{-3}\ \Omega\text{m}$, $\rho_{\text{Cu_spots}3} = 1 \cdot 10^{-2}\ \Omega\text{m}$, $\rho_{\text{Cu_disk}} = 1.72 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$).

Modificările de temperatură ale tuturor celor patru instanțe din Fig 5.7 și 5.8 sunt reprezentate în Fig 5.9.

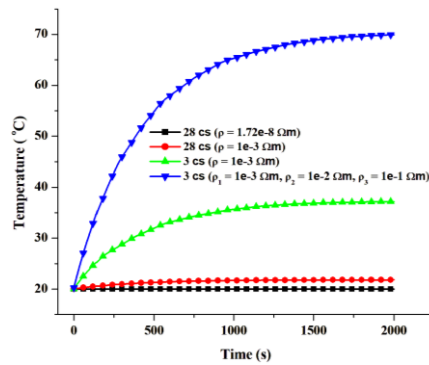


Fig. 5.9. Variațiile de temperatură în timp determinate în cele patru situații.

Fig. 5.7a nu prezintă nicio modificare semnificativă a temperaturii, dar figurile 5.7b, 5.8a și 5.8b prezintă temperaturi maxime de 21 °C, 37 °C, respectiv 69 °C, ceea ce indică faptul că scăderea suprafețelor conductoare de electricitate pe suprafața de contact crește nivelul temperaturii. [5.3]

5.1.4. Discuție

Studiul a analizat valorile rezistenței de contact pentru discurile de cupru care interacționează prin 24 de puncte de contact circulare. Au fost utilizate metodele Greenwood și Holm, valorile numerice fiind în mod constant mai mici decât cele rezultate din modelele analitice. Valoarea numerică a fost cu 80%, respectiv 10% diferită de valorile Greenwood și Holm pentru raze ale punctelor de contact de 0,1 mm. Pentru raze ale punctelor de 0,5 și 0,3 mm, Holm a obținut o valoare dublă față de cea numerică, în timp ce Greenwood a obținut rezultate de 7 ori mai mari. Numărul mare al zonelor de contact cu o rezistivitate ridicată duce la creșterea rezistenței de contact a conectorului acest lucru este datorat impurităților de pe suprafața de contact al acestuia. Acest lucru este comun în cazul conexiunilor electrice deteriorate și observat, de asemenea, în lucrările lui Shibata et al. [5.4]

5.2. Modelul IV (Procedură și Obiective)

Modelul IV utilizează electrozi de cupru conectați prin puncte de ZrCu, cu un curent continuu de 10 mA. Distribuția câmpului electric este estimată cu ajutorul metodei FEM pentru noduri de contact electric în COMSOL Multiphysics pentru puncte de contact cu raza de 0,5 mm și cu grosimea de 1 μm, 10 μm, respectiv 13 μm, luând în considerare sarcinile normale de apăsare de 500, 700, 800, 820, 900 și 920 de grame. Rezistența de contact a fost calculată pentru fiecare dimensiune a razelor punctelor și s-a efectuat o analiză de îmbătrânire prin creșterea rezistivității acestora. Pentru calculul rezistenței de contact s-a utilizat modelul analitic al lui Lee și Drew [5.5], exprimat ca rezultat al forței de apăsare:

$$R_c = [\rho^2 \eta \pi H / 4F]^{1/2} \quad (17)$$

unde ρ este rezistivitatea metalului conductor, η este un coeficient real pentru starea de curățenie a suprafeței metalului (≈ 1), H reprezintă duritatea metalului, iar forța exercitată este notată cu F .

5.2.1. Rezultate

5.2.1.1. Grosimea Punctului de Contact de 1 μm

Fig. 5.10 demonstrează distribuția potențialului electric calculată pentru un curent de intrare de 10 mA, $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$, $\rho_{\text{electrodes}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, înălțimea medie a asperităților și rugozitatea suprafeței $\sigma_{\text{asp}} = 0,3 \mu\text{m}$ și panta medie a asperităților de rugozitate a suprafeței $m_{\text{asp}} = 0,4$ luând în considerare o grosime de 1 μm a punctelor de contact.

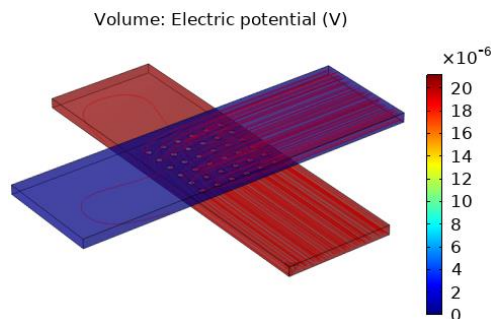


Fig. 5.11. Distribuția potențialului electric pentru un curent de 10 mA (ST: 1 μm).

În Fig. 5.11 este afișat rezultatul rezistenței contactului simulat ca urmare a unei sarcini adăugate atunci când conectorul electric este considerat neîmbătrânit.

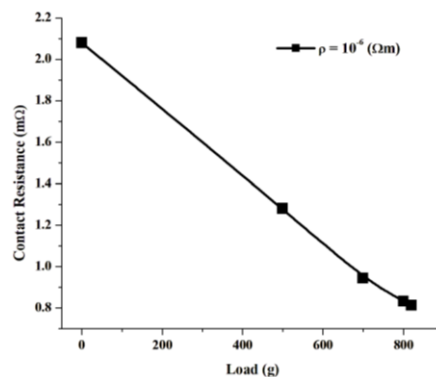


Fig. 5.11. Rezistența de contact calculată în funcție de sarcina aplicată contactului: $\rho_{\text{electrodes}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ și $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ (ST: 1 μm).

5.2.1.2. Grosimea Punctului de Contact de 10 μm

Fig. 5.12 prezintă distribuția potențialului electric pentru un curent de 10 mA, $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$, $\rho_{\text{electrodes}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, înălțimea medie a asperităților și rugozitatea suprafeței

$\sigma_{asp} = 0.6 \mu\text{m}$ și panta medie a asperităților de rugozitate a suprafeței $m_{asp} = 0.4$ luând în considerare o grosime de $10 \mu\text{m}$ a punctelor de contact.

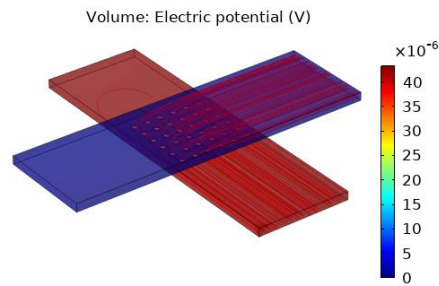


Fig. 5.12. Distribuția potențialului electric pentru un curent de 10 mA (ST: $10 \mu\text{m}$).

În Fig. 5.13 este reprezentată rezistența de contact determinată pentru un contact electric neîmbătrânit ca urmare a unei sarcini aplicate contactului.

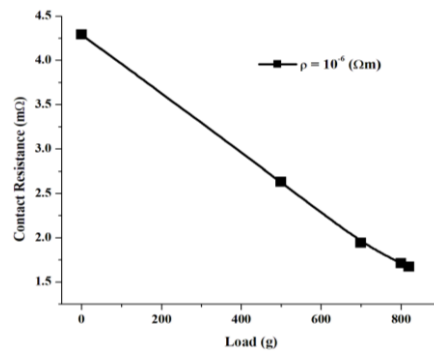


Fig. 5.13. Rezistența de contact calculată în funcție de sarcina aplicată contactului: $\rho_{\text{electrodes}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ și $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ (ST: $10 \mu\text{m}$).

5.2.1.3. Grosimea Punctului de Contact de $13 \mu\text{m}$

Fig. 5.14 prezintă distribuția potențialului electric pentru un curent de 10 mA, $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$, $\rho_{\text{electrodes}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, înălțimea medie a asperităților și rugozitatea suprafeței $\sigma_{asp} = 1 \mu\text{m}$ și panta medie a asperităților de rugozitate a suprafeței $m_{asp} = 0.4$ luând în considerare o grosime de $13 \mu\text{m}$ a punctelor de contact.

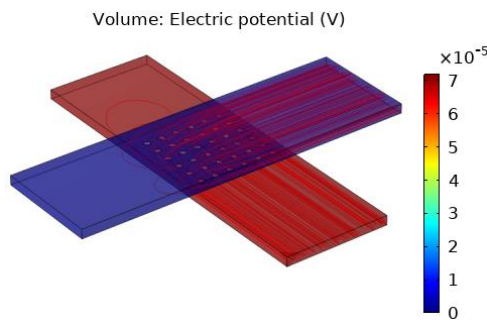


Fig. 5.14. Distribuția potențialului electric pentru un curent de 10 mA (ST: $13 \mu\text{m}$)

În Fig. 5.15 este reprezentată rezistența de contact determinată pentru un contact electric neîmbătrânit ca urmare a unei sarcini aplicate contactului.

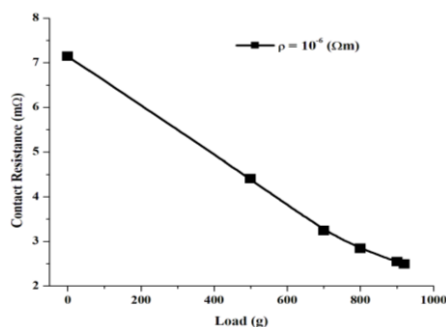


Fig. 5.15. Rezistența de contact calculată în funcție de sarcina aplicată contactului: $\rho_{\text{electrodes}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ and $\rho_{\text{ZrCuSpots}} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ (ST: 13 μm).

5.2.1.4. Soluție Analitică

Fig. 5.16 prezintă rezistența de contact în funcție de sarcina aplicată evaluată cu ajutorul expresiei analitice din ecuația (17).

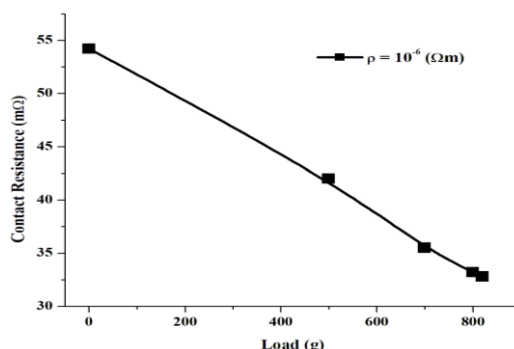


Fig. 5.16. Calculul rezistenței de contact cu valori analitice din ecuația (17).

5.2.2. Efectul îmbătrânirii asupra rezistenței electrice (modelul IV)

Studiul examinează impactul îmbătrânirii asupra rezistenței electrice în modelul IV, considerând o rezistivitate de ordin superior (10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , $10^{-2} \Omega\text{m}$) a punctelor de ZrCu, rezistivitatea electrozilor de cupru rămânând lafel ($1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$), pentru un curent de 10 mA. Rezistența de contact ca urmare a aplicării unei sarcini a fost studiată pentru toate grosimile de 1 μm , 10 μm , respectiv 13 μm .

5.2.2.1. Rezultate

5.2.2.1.1. Grosimea punctului de contact de 1 μm

Rezistența de contact în funcție de sarcina aplicată este prezentată în Fig. 5.17 pentru diferite valori ale rezistivității punctelor de ZrCu de pe suprafața de contact, cu o grosime a punctelor de 1 μm și un curent injectat de 10 mA.

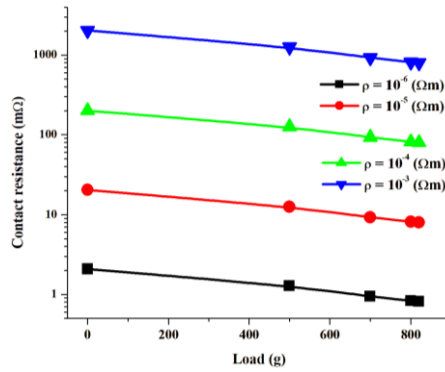


Fig. 5.17. Rezistența de contact indicând valorile calculate pentru $\rho_{\text{Zrcuspots}} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_{\text{Zrcuspots}} = 1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_{\text{Zrcuspots}} = 1 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_{\text{Zrcuspots}} = 1 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ și $\rho_{\text{electrodes}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (ST: 1 μm).

5.2.2.1.2. Grosimea punctului de contact de 10 μm

Fig. 5.18 afișează rezistența de contact estimată pentru diferite valori ale rezistivității punctelor de ZrCu de pe suprafața de contact, cu o grosime a punctelor de 10 μm și un curent aplicat de 10mA.

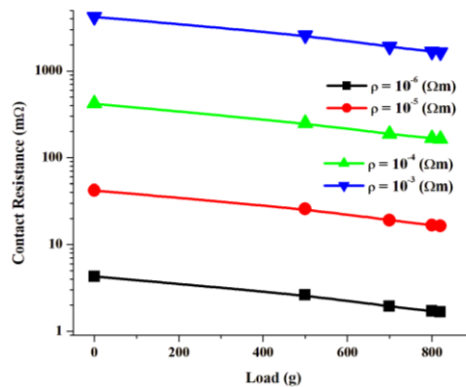


Fig. 5.18. Rezistența de contact indicând valorile calculate pentru $\rho_{\text{Zrcuspots}} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_{\text{Zrcuspots}} = 1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_{\text{Zrcuspots}} = 1 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_{\text{Zrcuspots}} = 1 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ și $\rho_{\text{electrodes}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (ST: 10 μm).

5.2.2.1.3. Grosimea Punctului de Contact de 13 μm

Rezistența de contact evaluată pentru diferite valori ale punctelor de ZrCu cu o grosime de 13 μm pentru un curent injectat de 10 mA este reprezentată în Fig. 5.19.

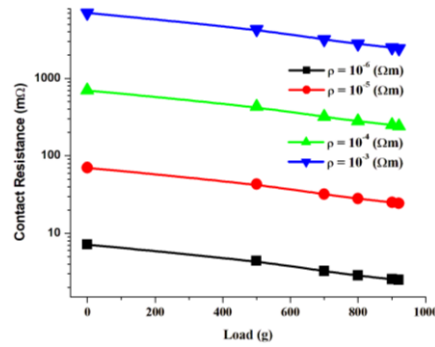


Fig. 5.19. Rezistența de contact indicând valorile calculate pentru $\rho_{Zrcuspots} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_{Zrcuspots} = 1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_{Zrcuspots} = 1 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_{Zrcuspots} = 1 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ și $\rho_{electrodes} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (ST: 13 μm).

5.2.3. Modelul IV Simulare Electrotermică (Procedură și Obiective)

Problemele electromagnetice și termice ale modelului IV au fost analizate folosind densitatea volumică a pierderilor electrice din simularea electromagnetă, utilizând nodul de contact electric din pachetul FEM COMSOL Multiphysics. Configurațiile de contact precum Modelul IV sunt supuse unor sarcini variabile ducând la deformări. Aceste modificări afectează caracteristicile contactului și uniformitatea sarcinii aplicate. Analiza de îmbătrânire este efectuată pentru fiecare grosime a punctelor de contact prin creșterea valorii rezistivității acestora .

5.2.3.1. Rezultate

În Fig. 5.20 este prezentată temperatura calculată pentru un curent de 10 mA, $\rho_{ZrCuspots} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$, $\rho_{electrodes} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ și grosimea punctelor ST: 13 μm , la $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. În condiții normale de funcționare, când contactul este considerat neîmbătrânit, distribuția temperaturii simulate nu prezintă o creștere semnificativă față de temperatura inițială T_0 . Aceeași concluzie a fost obținută pentru toate grosimile punctelor de contact (1 μm , 10 μm , 13 μm).

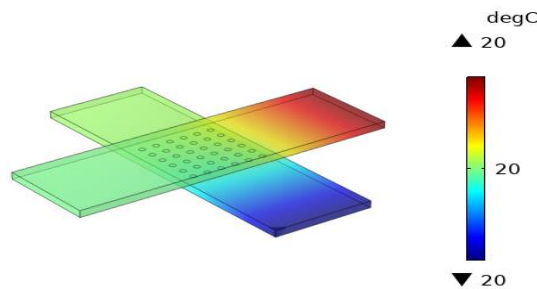


Fig. 5.20. Distribuția temperaturii pentru o grosime a punctelor de 13 μm ($\rho_{Zrcuspots} = 1.72 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_{electrodes} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$).

5.2.3.1.1. Analiza Electrotermică (Grosimea Punctului de Contact de 1 μm)

În cazul în care punctele de ZrCu de pe suprafața de contact se degradează și devin mai rezistive la trecerea curentului, sau trec prin unele modificări prin care unele puncte devin izolante, distribuția temperaturii în regim staționar în funcție de sarcina aplicată contactului pentru o grosime a punctelor de 1 μm este ilustrată în Fig. 5.21 pentru: (a) 36 de puncte având $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$; (b) numai 4 puncte conducătoare având $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$; (c) 4 puncte (2 având $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$ și 2 având $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-1} \Omega\text{m}$), cu rezistivitatea electrozilor de cupru $\rho_{\text{electrodes}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ în toate cazurile.

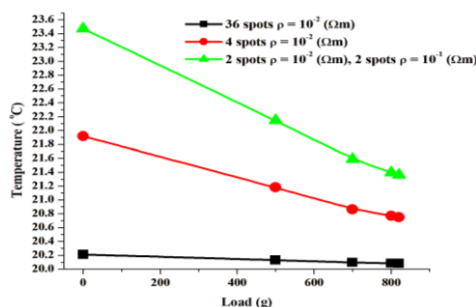


Fig. 5.21. Variația temperaturii în funcție de sarcina aplicată contactului (ST: 1 μm): (a) 36 puncte ($\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$); (b) 4 puncte ($\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$); (c) 4 puncte (2 puncte cu $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$ și 2 puncte cu $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-1} \Omega\text{m}$).

5.2.3.1.2. Analiză Electrotermică (Grosimea Punctului de Contact de 10 μm)

Fig. 5. 22 prezintă distribuția temperaturii în regim staționar în funcție de sarcina aplicată contactului pentru o grosime a punctelor de contact de 10 μm cu: (a) 36 de puncte avand $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$; (b) 4 puncte având $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$; (c) 4 puncte (2 având $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$ și 2 $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-1} \Omega\text{m}$), cu rezistivitatea electrozilor de cupru $\rho_{\text{electrodes}} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ în toate cazurile.

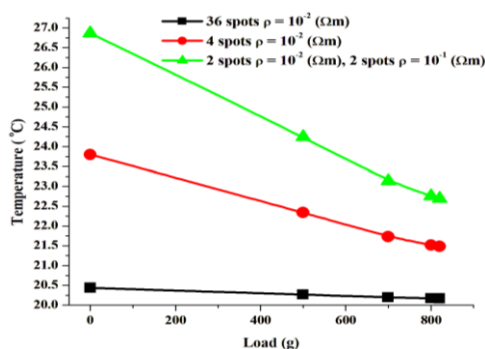


Fig. 5.22. Variația temperaturii în funcție de sarcina aplicată contactului (ST: 10 μm): (a) 36 puncte ($\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$); (b) puncte ($\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$); (c) 4 puncte (2 puncte cu $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$ și 2 puncte cu $\rho_{\text{ZrCuspots}} = 1 \cdot 10^{-1} \Omega\text{m}$).

5.2.3.1.3. Analiză Electrotermică (Grosimea Punctului de Contact de 13 μm)

Fig. 5. 23 prezintă temperatura în regim staționar a modelului de contact electric în funcție de sarcina aplicată contactului cu o grosime a punctelor de 13 μm pentru: (a) 36 puncte având $\rho_{\text{ZrCuSpots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$; (b) 4 puncte având $\rho_{\text{ZrCuSpots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$; (c) 4 puncte (2 având $\rho_{\text{ZrCuSpots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$ și 2 având $\rho_{\text{ZrCuSpots}} = 1 \cdot 10^{-1} \Omega\text{m}$), cu rezistivitatea electrozilor de cupru $\rho_{\text{electrodes}} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ în toate cazurile.

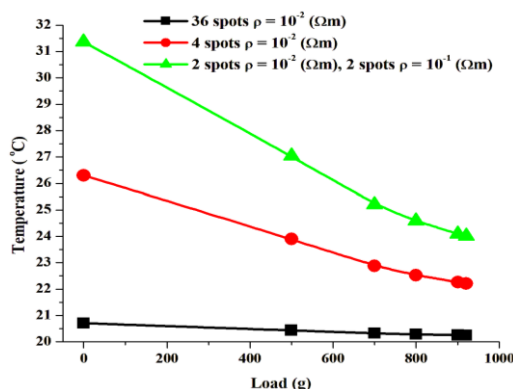


Fig. 5.23. Variația temperaturii în funcție de sarcina de contact (ST: 13 μm): (a) 36 puncte ($\rho_{\text{ZrCuSpots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$); (b) 4 puncte ($\rho_{\text{ZrCuSpots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$); (c) 4 puncte (2 puncte cu $\rho_{\text{ZrCuSpots}} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$ și 2 puncte cu $\rho_{\text{ZrCuSpots}} = 1 \cdot 10^{-1} \Omega\text{m}$).

5.2.4. Discuție

Studiul examinează rezistența de contact a electrozilor de cupru conectați prin puncte de ZrCu, utilizând metode numerice și analitice și analizând distribuția temperaturii. Evaluarea Multiphysics demonstrează că rezistența de contact variază între 7 m Ω (ST: 13 μm) și 0,8 m Ω (ST: 1 μm) pentru un contact neîmbătrânit în condiții normale. Soluțiile analitice arată valori mai mari ale rezistenței față de cele obținute numeric, toate valorile fiind exprimate în [m Ω] conform standardelor IEC (IEC-512-2-2a).

În Fig 5.17-5.19 se prezintă efectul îmbătrânirii asupra rezistenței de contact. Așa cum se anticipa, rezistența de contact crește odată cu rezistivitatea punctelor ZrCu de pe suprafață și scade atunci când valoarea sarcinii aplicate crește; caracteristici similare ale rezistenței de contact în funcție de sarcina aplicată au fost observate și în Fig 5.6-5.8. Deși temperatura maximă simulată în Fig. 5.21-5.23 a fost de 23.5 °C, 26.9 °C, respectiv 31.5 °C, această temperatură poate crește rapid în prezența factorilor de îmbătrânire din mediile de funcționare a contactelor electrice, cum ar fi în apropierea motorului unui vehicul.

CAPITOLUL 6 - VALIDAREA EXPERIMENTALĂ A CALCULULUI REZISTENȚEI DE CONTACT

Acest capitol prezintă analiza experimentală a calculului rezistenței de contact și are ca scop validarea rezultatelor numerice obținute în modelul IV și analiza deteriorării conexiunilor electrice prin efectuarea îmbătrânirii termice accelerate pe eșantioane de contact fabricate prin depunere în vid a unui aliaj ZrCu utilizând un echipament de depunere cu arc catodic. Rezistența de contact a fost evaluată folosind o tehnică de măsurare cu patru sonde și a unui multimetru Keithley în condiții normale de temperatură și presiune.

6.1. Eșantioane

Cei doi electrozi ai contactului sunt fabricați din laminat placat cu cupru (CCL), iar pe unul dintre aceștia sunt depuse puncte ZrCu pentru a imita un contact real (imperfect). Pentru depunerea punctelor pe electrodul inferior s-a folosit o mască realizată dintr-o placă de circuit (PCB) cu 36 de găuri, dimensiune și forma punctelor fiind date de aceasta, ca în Fig. 6.1.

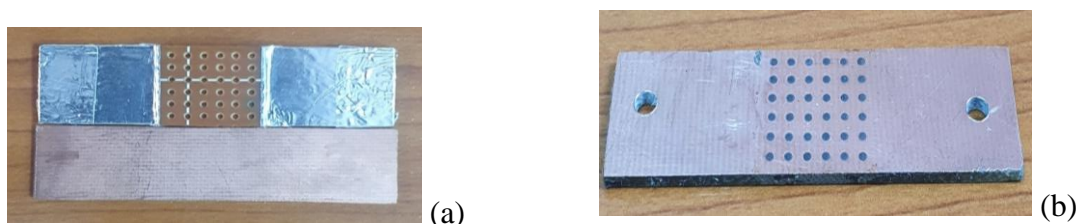


Fig. 6.1. Eșantion de contact: (a) înainte de depunere; (b) după depunerea straturilor de ZrCu.

Punctele au fost realizate prin metoda depunerii cu arc catodic cu un singur catod construit din aliaj ZrCu (50 % Zr, 50 % Cu, puritate 99,9 %) furnizat de Cathay Advanced Materials Limited. Timpul de depunere a fost variat între 20 și 100 de minute pentru a obține diferite grosimi de acoperire cuprinse între 1 și 13 μm . Fig. 6.2 ilustrează grosimea stratului de acoperire obținut pentru o grosime de 1 μm .

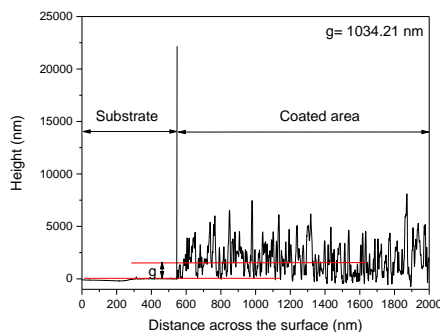


Fig. 6.2. Grosimea acoperirilor într-o zonă aleasă aleatoriu.

6.2. Configurație Experimentală și Măsurători

În această teză s-a folosit o tehnică de măsurare a rezistenței cu patru sonde pentru a determina experimental rezistența de contact folosind un multimetru Keithley 2700, cu un curent maxim de 10 mA (Fig. 6.3).

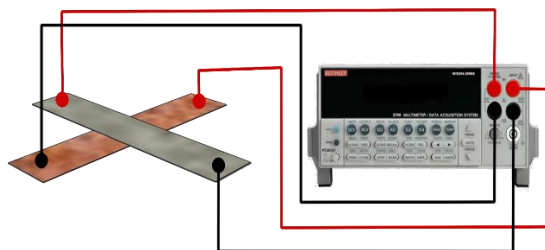


Fig. 6.3. Măsurarea rezistenței cu patru sonde a multimetrului Keithley.

Pentru măsurarea rezistenței de contact s-a folosit un ansamblu format din doi electrozi așezați în formă de cruce deasupra cărora au fost aplicate greutateți de 500, 700, 800, 820, 900, respectiv 920g ca în Fig. 6.4. După evaluarea rezistenței inițiale s-a realizat îmbătrânirea termică într-un cuptor cu aer forțat timp de 277 de ore la 50°C (Fig. 6.5). Toate determinările rezistenței de contact au fost efectuate la temperatura camerei, fără carcasă.

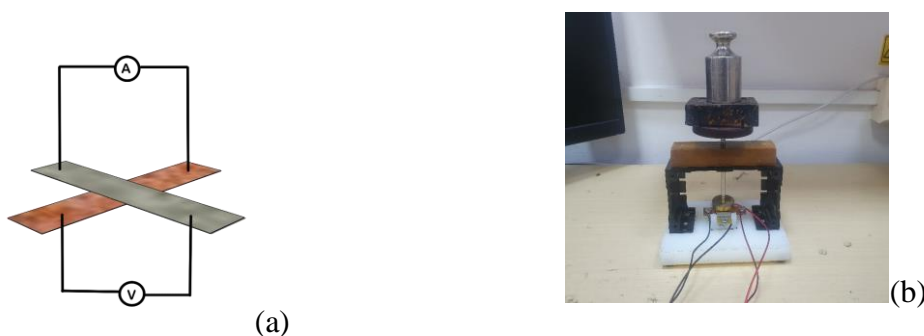


Fig. 6.4. Instalație experimentală pentru determinarea rezistenței de contact: (a) Schema unui circuit de măsură cu patru sonde, (b) ansamblu de măsurare cu greutateți plasate pentru creșterea forței de apăsare a contactului.



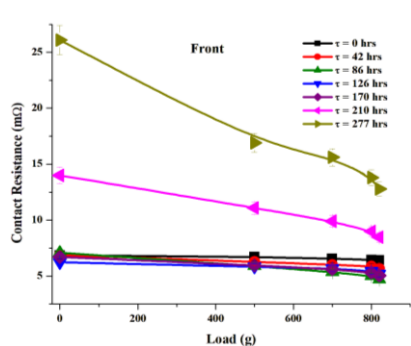
Fig. 6.5. Eșantioane de contact îmbătrânite în prezența unei soluții de clorură de sodiu (NaCl) în cuptorul cu aer forțat.

Procedura de îmbătrânire termică accelerată și de măsurare a rezistenței de contact presupune configurarea probelor de contact, măsurarea rezistenței inițiale pentru diferite poziții ale sarcinilor aplicate cu ajutorul multimetrului Keithley 2700, plasarea ulterioară într-o etuvă cu aer forțat timp de 277 de ore și realizarea măsurătorilor rezistenței de contact la intervale de 42 de ore. Experimentele au fost efectuate pe eșantioane de contact cu grosimi de depunere de 1 μm , 10 μm , respectiv 13 μm .

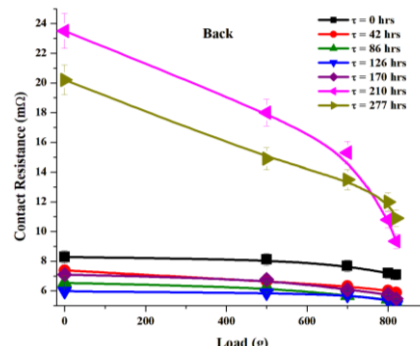
6.3. Rezultate Experimentale

6.3.1. Eșantion de contact cu aliaj ZrCu - Depunere Puncte de 1 μm

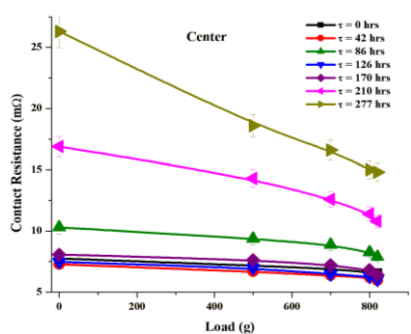
Valorile rezistenței de contact au fost determinate în funcție de poziționarea greutatei pe ansamblul de măsurare în diferite poziții (aleatoriu, în spate, în dreapta, în centru, în față, în stânga) și la diferite perioade de îmbătrânire. Pentru fiecare perioadă de îmbătrânire (0 - 277 ore), studiul a evidențiat o tendință mixtă în ceea ce privește rezistența de contact pe măsura creșterii timpului de îmbătrânire, cu o scădere și o creștere observate în intervalul de la 0 la 86 de ore și o creștere în intervalul 126-277 de ore, posibil din cauza faptului că măsurătorile rezistenței de contact nu au fost efectuate în același loc pentru fiecare măsurătoare. În general, stresul termic accelerează îmbătrânirea conexiunilor electrice. Fig. 6.6a-f prezintă măsurătorile rezistenței de contact obținute pentru toate pozițiile în funcție de forța aplicată pe platforma ansamblului de măsurare.



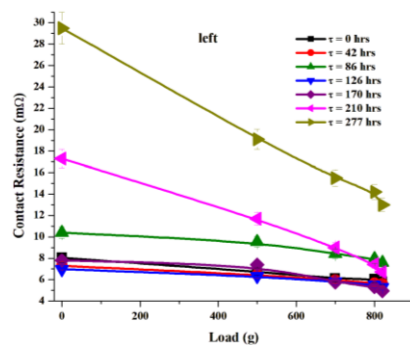
(a)



(b)



(c)



(d)

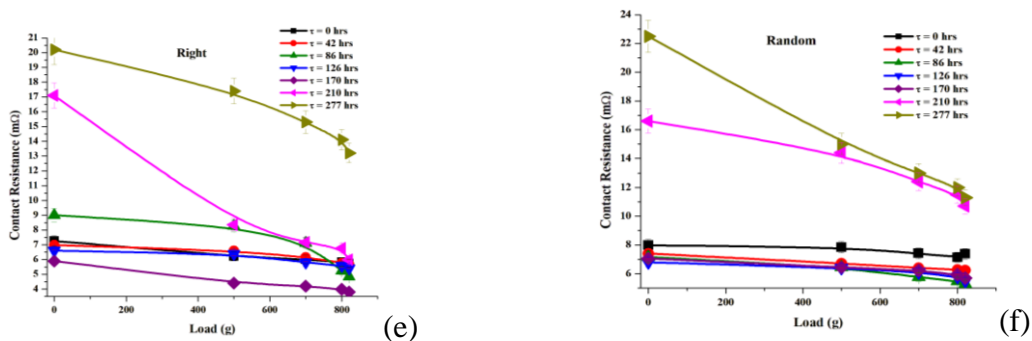


Fig. 6.6. Rezistența de contact pentru diferite poziții ale forței aplicate, măsurată pentru diferite perioade de îmbătrânire (DT: 1 μm): (a) față, (b) spate, (c) centru, (d) stânga, (e) dreapta, (f) aleatoriu.

Pentru o analiză clară și concisă, rezistența de contact măsurată pentru toate pozițiile a fost calculată ca medie și prezentată în tabelul 6.1 și în figura 6.7. Aceasta arată că rezistența de contact crește odată cu timpul de îmbătrânire și este influențată de sarcina de contact, rezistența de contact scăzând pe măsură ce crește sarcina de contact, datorită creșterii suprafeței reale de contact la interfața probei de contact electric.

Tabelul 6.1.

Valori Medii ale Rezistenței de Contact Măsurate pentru Diferite Poziții ale Forței Aplicate (DT: 1 μm)

Timp de îmbătrânire (ore)	Greutate (g)					-
	0	500	700	800	820	
0	7.70	7.14	6.78	6.55	6.50	Rezistența de contact (mΩ)
86	8.41	7.63	6.87	6.23	5.92	
210	17.6	13	11.1	9.47	8.66	
277	24.1	17	14.9	13.5	12.7	

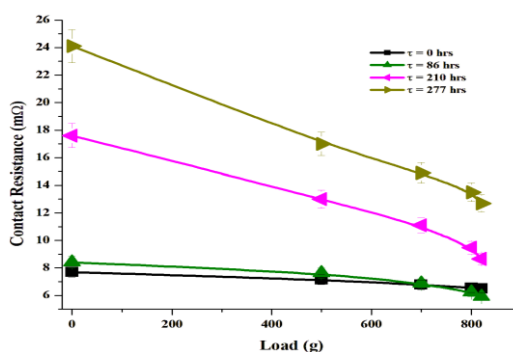


Fig. 6.7. Rezistența de contact în funcție de sarcina de contact determinată prin calcularea mediei datelor obținute în mai multe puncte de forță aplicată (DT: 1 μm).

Fig. 6.8 demonstrează că rezistența de contact crește odată cu timpul de îmbătrânire, influențată de impurități și de condițiile de mediu. Creșterea rezistenței de contact poate duce la deteriorarea și eventuala defecțiune a contactelor electrice.

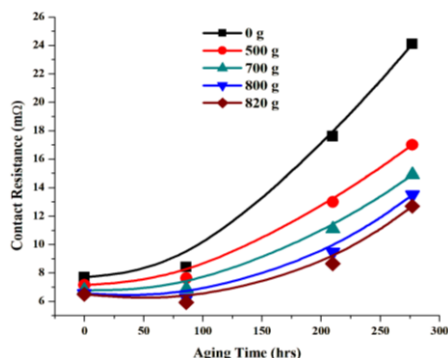


Fig. 6.8. Modificarea rezistenței de contact în funcție de timpul de îmbătrânire (DT: 1 μm).

6.3.2. Eșantion de contact cu aliaj ZrCu - Depunere Puncte de 10 μm

Rezistența de contact a unei probe cu acoperiri din aliaj ZrCu de 10 μm grosime a fost evaluată în diferite poziții și a fost calculată media pentru a obține valoarea finală. Tabelul 6.2 și Fig. 6.9 ilustrează valorile medii ale rezistenței de contact.

Tabelul 6.2.

Valori Medii ale Rezistenței de Contact Măsurate pentru Diferite Poziții ale Forței Aplicate (DT: 10 μm)

<i>Timp de îmbătrânire (ore)</i>	<i>Greutate (g)</i>					<i>Rezistența de contact (mΩ)</i>
	0	500	700	800	820	
0	9.96	7.92	7.22	7.10	6.92	
42	11.1	9.12	8.26	8	7.74	
86	30.5	20.8	18.7	17.8	17.1	
126	337	196	67.6	46.7	43.3	
170	16.6	14.9	14.2	13.6	13.4	
210	17.1	13.3	12.5	12	11.6	
277	42.2	29.1	25.9	24.8	23.7	

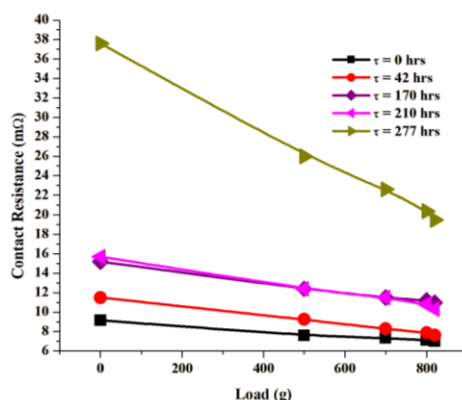


Fig. 6.9. Rezistența de contact în funcție de sarcina de contact determinată prin calcularea mediei datelor obținute în mai multe puncte de forță aplicată (DT: 10 μm).

Fig. 6.10 arată creșterea rezistenței de contact în timp datorită oxidării, contaminării, rugozității și uzurii suprafețelor de contact. Acest lucru este valabil în special pentru metalele predispuse la coroziune și pentru condițiile de mediu dure. În timp, aceste elemente pot duce la o creștere treptată a rezistenței.

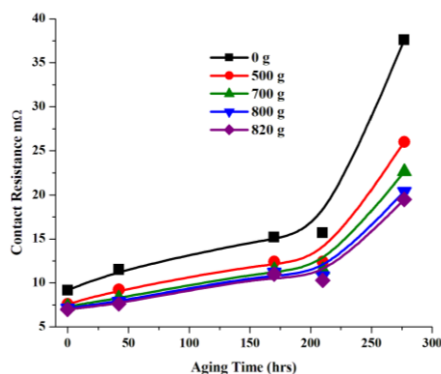


Fig. 6.10. Modificarea rezistenței de contact în funcție de timpul de îmbătrânire (DT: 10 μm).

6.3.3. Eșantion de contact cu aliaj ZrCu - Depunere Puncte de 13 μm

Pentru calculul rezistenței de contact la depunere de ZrCu cu grosimea 13 μm s-au analizat cinci eșantioane (I, II, III, IV și V). Tabelul 6.3 și Fig. 6.11 afișează valorile medii ale rezistenței de contact ale eșantionului III pe măsură ce acesta îmbătrânește în timp, cu diferite sarcini aplicate. Fig. 6.12 prezintă rezistența de contact în funcție de timpul de îmbătrânire. În conformitate cu așteptările, rezistența de contact crește odată cu timpul de îmbătrânire în toate cazurile.

Tabelul 6.3.

Valori Medii ale Rezistenței de Contact Măsurate pentru Diferite Poziții ale Forței Aplicate
(Proba III)

Timp de îmbătrânire (ore)	Greutate (g)						-
	0	500	700	800	900	920	
0	11.5	11	10.6	10.3	9.91	9.75	<i>Rezistența de contact (mΩ)</i>
42	50.7	43.8	37.5	34.1	31.4	30.5	
86	85.6	77.4	72.9	68.2	62.6	60.9	
210	156	131	116	107	101	95.3	
277	588	445	388	360	311	285	

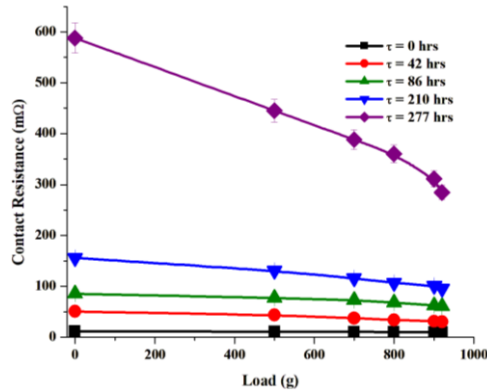


Fig. 6.11. Rezistența de contact în funcție de forța de apăsare a fost determinată prin calcularea mediei datelor obținute în mai multe poziții de aplicare a forței (proba III).

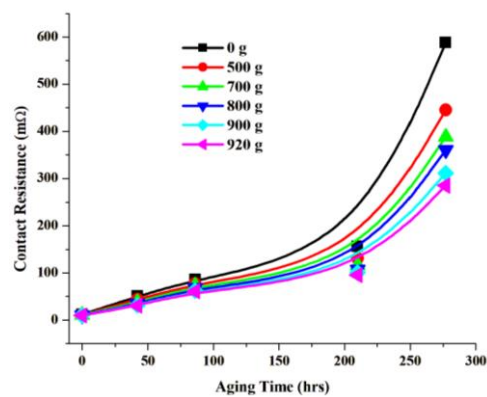


Fig. 6.12. Modificarea rezistenței de contact în funcție de timpul de îmbătrânire (proba III).

6.4. Discuție

Studiile experimentale validează modelul IV și evaluează schimbările rezistenței electrice la nivelul eșantioanelor de contact electric. Pentru fabricarea acestor eșantioane s-a folosit laminat placat cu cupru (CCL), iar pentru a imita un contact real (imperfect) au fost depuse puncte de ZrCu (aliaj cu o rezistivitate mai mare decât a cuprului) cu grosimi de 1 μm , 10 μm , respectiv 13 μm pe suprafața unuia dintre cei doi electrozi componenți. Pentru a studia efectele pe termen lung s-a realizat îmbătrânirea termică accelerată cu ajutorul unui cuptor cu aer forțat.

Studiul are ca scop descrierea contactelor electrice și impactul influențelor externe, cum ar fi temperatura, asupra modificărilor rezistenței de contact. Experimentul a fost realizat pe următoarele eșantioane:

- Un eșantion de contact cu o grosime de depunere de 1 μm ;
- Un eșantion de contact cu o grosime de depunere de 10 μm ;
- Cinci eșantioane de contact cu o grosime de depunere de 13 μm (eșantioanele I - V).

Studiul a utilizat o metodă de măsurare a rezistenței cu patru sonde pentru a determina valorile rezistenței de contact pentru toate probele de contact. Sarcina a fost plasată în diferite locații pe platforma de măsurare pentru diferite perioade de îmbătrânire (0-277 de ore). Pentru o analiză mai bună și mai detaliată a variației rezistenței de contact a probelor fabricate s-au calculat valori medii pentru fiecare caz. Rezultatele au arătat că rezistența de contact scade pe măsură ce crește sarcina aplicată.

Deși măsurătorile au fost efectuate la temperatura camerei cu o aplicare controlată a sarcinii și măsurate constant, relația dintre rezistența de contact și timpul de îmbătrânire pentru toate pozițiile de sarcină aplicată are o tendință variabilă de creștere și descreștere. Acest lucru se datorează diferențelor dintre punctele de contact și modificărilor fizice ale materialului sau ale componentei în timp. Variațiile în sarcina aplicată materialului sau componentei contribuie, de asemenea, la variațiile rezistenței de contact. În urma acestor modificări, rezistența medie de contact în funcție de timpul de îmbătrânire arată că mecanismele de îmbătrânire, cum ar fi temperatura, umiditatea și straturile de oxid, deteriorează contactele electrice prin creșterea rezistenței de contact, ceea ce duce în cele din urmă la defecțiuni.

În capitolul 5, a fost implementată o analiză numerică pe modelul IV și a fost simulată rezistența de contact în funcție de sarcina aplicată pentru un contact electric neîmbătrânit cu o grosime a punctelor (ST) de 1 μm , 10 μm , respectiv 13 μm . După cum este ilustrat în Fig. 6.13, rezultatele numerice sunt comparate cu rezultatele experimentale corespunzătoare.

La o sarcină de contact de 0 g - 800 g, pentru o grosime a punctelor de 1 μm , rezistența de contact variază între 7,7 $\text{m}\Omega$ și 6,5 $\text{m}\Omega$ (experimental) și 2 $\text{m}\Omega$ - 0,8 $\text{m}\Omega$ (numeric); 9 $\text{m}\Omega$ - 7 $\text{m}\Omega$ (experimental) și 4 $\text{m}\Omega$ - 1,5 $\text{m}\Omega$ (numeric) pentru grosimea punctelor de 10 μm ; 11,5 $\text{m}\Omega$ - 9,8 $\text{m}\Omega$ (experimental) și 7 $\text{m}\Omega$ - 2,8 $\text{m}\Omega$ (numeric) pentru grosimea punctelor de 13 μm .

Comparația dintre analiza numerică și cea experimentală arată o concordanță în diverse aspecte, inclusiv curbele și rezistența de contact. Ambele studii dau rezultate de ordinul $\text{m}\Omega$. Pe măsură ce sarcina de contact se îmbunătățește, rezistența de contact scade. Cu toate acestea, valorile experimentale ale rezistenței de contact sunt mai mari decât valorile analizei numerice din cauza suprafețelor aspre cu numeroase asperități la nivelul punctelor de ZrCu, ceea ce face dificilă realizarea contactului în același punct pentru fiecare măsurare.

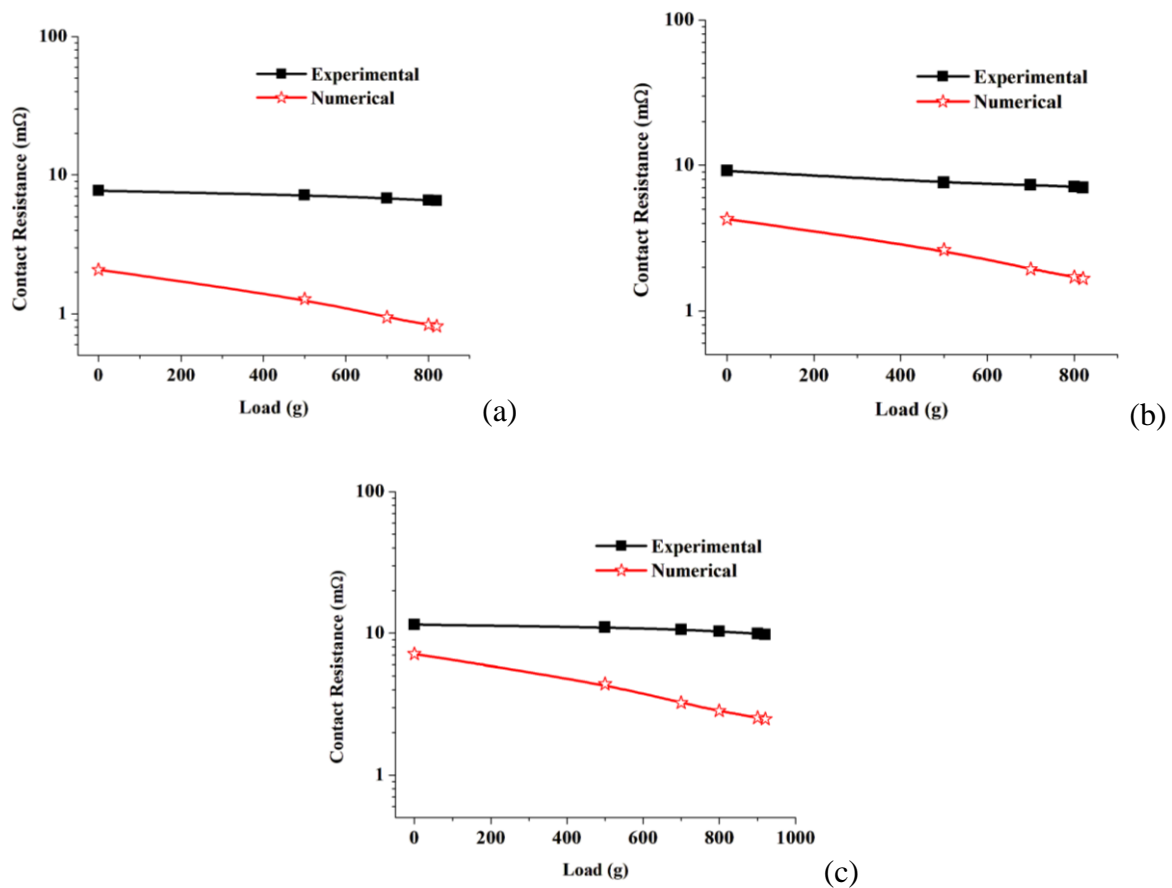


Fig. 6.13. Rezistența de contact în funcție de sarcina aplicată contactului pentru puncte de ZrCu cu grosimea de 1 μm (a); 10 μm (b); 13 μm (c) obținute numeric și experimental.

Rezultatele din Fig. 6.13 validează modelele numerice din punct de vedere electric, ceea ce le face fiabile pentru studiarea regimului termic. Aceasta înseamnă că regimul termic obținut exclusiv prin modelare numerică este fiabil și de încredere pentru estimarea caracteristicilor termice.

CONCLUZIE GENERALĂ, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI LUCRĂRI VIITOARE

Concluzie Generală

Această teză a abordat degradarea contactului electric de curent slab din cauza factorilor de îmbătrânire, utilizând analize numerice, analitice și experimentale. Capitolele 3, 4 și 5 au prezentat analiza numerică și analitică, în timp ce capitolul 6 s-a axat pe aspectul experimental.

Capitolul 3 a propus patru modele (Modelul I - IV) pentru a fi utilizate pentru partea de analiză numerică a tezei care a fost dezvoltată și prezentată. Acesta evidențiază modelul fizic, modelul geometric, modelul matematic și discretizarea domeniului de calcul pentru fiecare model dezvoltat.

Capitolul 4 prezintă analiza multifizică (electrotermică) efectuată pe modelele I și II, realizată în regim electrocinetic staționar. S-a demonstrat că variația temperaturii nu are un efect semnificativ asupra conductivității termice. Efectele factorilor de îmbătrânire, cum ar fi straturile de oxid și curentul, asupra procesului de degradare a contactului electric au fost analizate în ambele modele și s-a ajuns la concluzia că duc la creșterea temperaturii. Mai mult, s-a observat că temperatura a fost mai pronunțată pe suprafața zonei de contact. Această analiză multifizică a elaborat o imagine detaliată a procesului de degradare care are loc în cazul curenților slabi și a modului în care toți acești factori, în practică, pot accelera în timp deteriorarea conectorilor electrici.

Deoarece rezistența de contact este principalul criteriu de determinare a stării unui contact electric, capitolul 5 se concentrează pe calculul numeric (Multiphysics) și analitic al rezistenței de contact. Acest obiectiv a fost realizat utilizând Modelul III și Modelul IV, având în vedere natura și caracteristicile punctelor de pe suprafața de contact. În acest sens, a fost analizată atât numeric cât și analitic variația rezistenței de contact a punctelor în funcție de raza acestora (în Modelul III) și în funcție de sarcina aplicată (Modelul IV). Analiza numerică a fost realizată prin obținerea căderii de tensiune pe punctele de pe suprafața de contact a modelului, iar rezistența de contact a fost calculată cu ajutorul legii lui Ohm. Indiferent de modelul utilizat, s-a observat că rezistența de contact depinde de suprafața reală de contact a asperităților conectorului electric, adică suprafața reală de contact crește odată cu sarcina aplicată, ceea ce în cele din urmă îmbunătățește rezistența de contact. În plus, analiza termică nu a fost posibilă din punct de vedere analitic; modelarea numerică fiind cea mai bună soluție. Influența îmbătrânirii asupra rezistenței de contact a conectorilor de curent slab a arătat că rezistența de contact crește și duce la o creștere a temperaturii, ceea ce favorizează și accelerează procesul

de degradare. Deși modelele numerice dezvoltate prezentate în această teză au fost modele simplificate, rezultatele prezentate în această teză indică severitatea deteriorării pe care contactele electrice o pot obține datorită activităților factorilor de degradare precum straturile de oxid, temperatura, curentul etc.

În capitolul 6, probele de contact au fost fabricate folosind tehnica de depunere cu arc catodic. Eșantioanele au fost pregătite pe baza specificațiilor din modelul IV pentru a valida modelul numeric. Rezistența de contact a fost evaluată utilizând o tehnică de măsurare cu patru sonde. Pentru a valida modelul numeric, rezultatul rezistenței de contact obținut numeric pentru modelul IV a fost comparat cu cel obținut experimental. S-a observat că atât curbele numerice, cât și cele experimentale, pentru rezistența de contact în funcție de sarcina aplicată au fost similare, validând așadar rezultatele numerice. Valorile rezistenței de contact pentru analiza experimentală au fost mai mari decât cele ale analizei numerice în toate cazurile; acest lucru se datorează micilor variații în ce privește așezarea eșantioanelor în ansamblul de măsurare utilizat pentru determinările experimentale.

Contribuții Originale

- Teza a fost realizată prin documentarea elaborată asupra îmbătrânirii contactelor electrice, care are loc ca urmare a numeroși factori de îmbătrânire (temperatură, straturi de oxid etc.) și evidențierea efectului pe care aceștia îl au asupra rezistenței contactelor.
- Elaborarea de modele numerice cu diferite configurații și aplicarea unui studiu multifizic pentru studierea câmpului electro-mecanic și termic al modelelor de contact prin metoda elementelor finite în regim electrocinetic.
- Efectuarea unei analize complexe de îmbătrânire a modelelor numerice dezvoltate, luând în considerare diferite stări de degradare a modelelor (prezența straturilor de oxid, creșterea curentului, grosimea straturilor de oxid la interfață, variația conductivității electrice cu temperatura, creșterea și scăderea suprafeței reale de contact, aplicarea unei sarcini de contact).
- Efectuarea de calcule analitice pentru evaluarea rezistenței de contact luând în considerare modelul de contact cu mai multe puncte, precum și evaluarea numerică a rezistenței de contact.
- Comparație detaliată între rezultatele rezistenței de contact ale modelelor analitice și ale modelelor numerice. Analiza suplimentară a fost realizată prin evidențierea influenței îmbătrânirii asupra rezistenței de contact și a câmpului termic.

- Fabricarea probelor de contact electric prin depunere cu arc catodic și definirea caracterizării, compoziției, grosimii, morfologiei și rugozității acoperirilor depuse.
- Determinarea experimentală a rezistenței de contact și a procesului de îmbătrânire termică a probelor de contact fabricate, utilizând tehnica de măsurare a rezistenței cu patru sonde și, respectiv, a cuptorului cu aer forțat. Măsurarea rezistenței de contact a eșantioanelor a fost realizată prin crearea unui ansamblu de măsurare pentru a adapta eșantioanele de contact și sarcinile aplicate pentru măsurare.
- Studii experimentale privind influența îmbătrânirii accelerate (îmbătrânire termică în prezența soluțiilor de clorură de sodiu la o temperatură de 50 °C) și a sarcinii aplicate asupra rezistenței de contact.
- Prelucrarea datelor pentru analiza numerică și experimentală pentru diferite probe și reprezentarea grafică a tuturor rezultatelor, punând în evidență influența mecanismelor de îmbătrânire asupra contactelor electrice și o bună corelație între rezultatele experimentale și estimările numerice.

PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ

Pe baza studiilor realizate în cadrul prezentei teze de doctorat, se propune următoarea perspectivă asupra activității ulterioare:

- Îmbunătățirea modelelor numerice actuale din punct de vedere al geometriei prin dezvoltarea și încorporarea modelelor de contact în carcase și prin analiza diferitelor materiale folosite în fabricarea acestora. Din punct de vedere al simplificării ipotezei, prin definirea unei probleme multifizice bine structurate care să ia în considerare impactul mecanismului de convecție și radiație, al vibrațiilor asupra îmbătrânirii contactelor electrice.
- Studiarea aspectelor referitoare la cablurile de contact electric utilizate în aplicațiile de curenți slabi și rolul pe care acestea îl joacă în procesul de degradare a contactelor electrice.

BIBLIOGRAFIE

[1.1]. [2016-11 Imagebroschuere Steckverbinder engl.pdf](#)

[2.1]. Braunovic, Milenko. (2007). Reliability of power connections. Journal of Zhejiang University: Science A: Applied Physics & Engineering, 8. 343 – 356 doi:10.1631/jzus.2007.A0343.

[2.2]. Braunovic, M, Myshkin, Nikolai K, Konchits, Valery, V, “Electrical Contacts: Fundamentals, Applications, and Technology.” *CRC Press; 1st edition* (December 15, 2006).

[2.3]. Weißenfels, Christian and Wriggers, Peter. (2010). “Numerical modeling of electrical contacts.” *Computational Mechanics*. 46. 301-314, doi:10.1007/s00466-009-0454-8.

[2.4]. Holm, R. “Electric Contacts Theory and Application,” *4th ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany*, 1967.

[2.5]. J. A. Greenwood, “Constriction Resistance and the Real Area of Contact,” *Brit. J. Appl. Phys.*, vol. 17, pp. 1621-1632, 1966.

[3.1]. G.-G. Dankat, A.-A. Dobre, and L.-M. Dumitran, “Numerical Simulation of Thermal Condition of a Low Current Electric Contact: n/a”, *Electric Machines, Materials and Drives- Present and Trends*, vol. 16, no. 1, pp. 53–61, Jan. 2020.

[3.2]. <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3395>

[3.3]. Liu, M., Lin, M.C. & Wang, C, “Enhancements of thermal conductivities with Cu, CuO, and carbon nanotube nanofluids and application of MWNT/water nanofluid on a water chiller system”. *Nanoscale Research Letters* 6, no. 297, 2011.

[3.4]. G. G. Dankat, A. A. Dobre and L. M. Dumitran, "Influence of Ageing on Electrothermal Condition of Low Current Contact," *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425242.

[3.5]. Dankat, Gideon Gwanzuwang, and Laurentiu Marius Dumitran. 2022. "Computation of the Electrical Resistance of a Low Current Multi-Spot Contact" *Materials* 15, no. 6: 2056. <https://doi.org/10.3390/ma15062056>.

[3.6]. Lee, Ching-Jen & Lin, Hsuan-Kai & Sun, S. & Huang, Jacob. (2010). Characteristic difference between ITO/ZrCu and ITO/Ag bi-layer films as transparent electrodes deposited on PET substrate. *Applied Surface Science - APPL SURF SCI*. 257. 239-243. 10.1016/j.apsusc.2010.06.074.

[3.7]. Filippov, V & Yagodin, Denis & Shunyaev, K & Leont'ev, L. (2018). Electrical Resistivity of Cu-Zr Melts. *Doklady Physical Chemistry*. 483. 155-158. Doi:10.1134/s0012501618120035.

[4.1]. G.-G. Dankat, A.-A. Dobre, and L.-M. Dumitran, “Numerical Simulation of Thermal Condition of a Low Current Electric Contact: n/a”, *Electric Machines, Materials and Drives- Present and Trends*, vol. 16, no. 1, pp. 53–61, Jan. 2020.

[4.2]. G. G. Dankat, A. A. Dobre and L. M. Dumitran, "Influence of Ageing on Electrothermal Condition of Low Current Contact," *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425242.

- [5.1]. G.-G. Dankat, A.-A. Dobre, and L.-M. Dumitran, "Analytical and Numerical Computation of Electrical Resistance in a Low Current Multi-Spots Metallic Contact", *Electric Machines, Materials and Drives- Present and Trends*, vol. 17, no. 1, pp. 52–59, Feb. 2022.
- [5.2]. Dankat, Gideon Gwanzuwang, and Laurentiu Marius Dumitran. 2022. "Computation of the Electrical Resistance of a Low Current Multi-Spot Contact" *Materials* 15, no. 6: 2056. <https://doi.org/10.3390/ma15062056>.
- [5.3]. Wang Shujuan, Hu Fang, Su Bonan, and Zhai Guofu, "Method for calculation of contact resistance and finite element simulation of contact temperature rise based on rough surface contact model," *26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012)*, 2012, pp. 317-321, doi: 10.1049/cp.2012.0668.
- [5.4]. Y. Shibata et al., "Detailed analysis of contact resistance of fretting corrosion track for the tin-plated contacts," *26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012)*, 2012, pp. 228-232, DOI: 10.1049/cp.2012.0652.
- [5.5]. P.G. Slade, *Electrical Contacts: Principles and Applications*, 2nd ed. CRC Press, pp 375 - 384 2014.
- [5.6]. P. Lindholm, "Numerical Study of Asperity Distribution in an Electrical Contact," *2011 IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, Minneapolis, MN, USA, 2011, pp. 1-5, doi: 10.1109/HOLM.2011.6034796.
- [5.7]. Junxing Chen, Mingzhe Rong, Fei Yang, Yi Wu, Hao Sun, and Yun Yang, "Numerical research on the electrical contact model and thermal analysis of the Roll-Ring," *2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*, Matsue, Japan, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEPE-ST.2013.6804345.
- [5.8]. T. Kondo, H. Nakata, J. Sekikawa, Y. Kubota, K. Hayakawa, and T. Nakamura, "An analysis of the relationship between contact resistance and fracture of oxide film for connector contacts using finite element method," *2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, New Orleans, LA, USA, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/HOLM.2014.7031025.