



**УНИВЕРЗИТЕТ
У НИШУ**

**Универзитетска
Библиотека
"Никола Тесла"**

**UNIVERSITY
OF NIŠ**

**University
Library
"Nikola Tesla"**



**ДИГИТАЛНИ
РЕПОЗИТОРИЈУМ
УНИВЕРЗИТЕТА
У НИШУ**

**Библиотека
Дисертације**

**DIGITAL
REPOSITORY
OF THE UNIVERSITY
OF NIŠ**

Ph.D. Theses

UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET

ANETA PRIJIĆ

Projektovanje i optimizacija
električnih kontakata i
termičkih prekidača

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, JUN 2007.

Ova doktorska disertacija je realizovana u okviru projekata "Istraživanje i razvoj tehnologija proizvodnje električnih kontakata" i "Razvoj tehnologije proizvodnje termičkih prekidača", finansiranih od strane Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije.

Imam zadovoljstvo da se ovom prilikom zahvalim svom mentoru, prof. dr Biljani Pešić na svesrdnoj pomoći u izradi ove disertacije, kao i rukovođenju naučno–istraživačkim radom koji je njoj prethodio. Svojim smernicama i sugestijama, kao i kritičkom procenom rezultata istraživanja, prof. Pešić je omogućila da ova disertacija dobije svoj konačan oblik.

Dugujem zahvalnost i kolegama prof. dr Draganu Pantiću, doc. dr Draganu Mančiću, dipl. ing Zoranu Petrušiću i dipl. ing Marjanu Blagojeviću na pomoći pri realizaciji eksperimentalnog dela istraživanja koja ova disertacija obuhvata.

Takođe se zahvaljujem svim kolegama sa katedre na iskazanom razumevanju tokom bavljenja naučnim radom i podstreku da njegovi rezultati dobiju zvaničnu formu.

Na kraju, ali sigurno ne sa najmanjim značajem, želim da zahvalim svom kolegi i supruzi prof. dr Zoranu Prjiću na stvaranju uslova za realizaciju istraživanja kojima se ova disertacija bavi, istrajnom nastojanju da me inspiriše ka sticanju novih naučnih saznanja, kao i na pomoći pri tehničkom oblikovanju disertacije. Istovremeno, punim srcem zahvaljujem i svojoj dečici Nikoli i Mariji na strpljenju i shvatanju da mama radi veoma važan posao i nema puno slobodnog vremena za njih.

Sadržaj

| | |
|--|-----------|
| Abstract | 1 |
| Uvod | 3 |
| I Električni kontakti | |
| 1 Osnovne postavke projektovanja i optimizacije električnih kontakata | 9 |
| 1.1 Parametri funkcionalnosti, kvaliteta i pouzdanosti električnih kontakata | 9 |
| 1.1.1 Uzroci degradacije električnih kontakata | 10 |
| 1.2 Tolerancije pri projektovanju | 15 |
| 1.3 Izbor kontaktnih materijala | 16 |
| 1.3.1 Mehanički aspekt izbora kontaktnih materijala | 17 |
| 1.3.2 Električni aspekt izbora kontaktnih materijala | 19 |
| 1.3.3 Pregled najčešće korišćenih kontaktnih materijala | 19 |
| 1.4 Određivanje geometrije i dimenzija električnih kontakata | 22 |
| 1.5 Određivanje minimalne sile kontaktiranja | 26 |
| 2 3–D simulacija električnih kontakata u električnom, termičkom i mehaničkom domenu | 32 |
| 2.1 Opis razmatranih struktura | 32 |
| 2.2 Postupak simulacije | 34 |
| 2.2.1 Teorijska postavka simulacije u spregnutim domenima | 34 |
| 2.2.2 Koraci simulacione procedure | 36 |
| 2.2.3 Parametri simulacije razmatranih struktura | 39 |
| 2.3 Raspodele električnih, termičkih i mehaničkih veličina unutar električnih kontakata | 42 |
| 2.3.1 Masivni Ag kontakti | 42 |
| 2.3.2 Bimetalni kontakti | 44 |
| 3 Optimizacija zakovičastih električnih kontakata | 53 |
| 3.1 Zavisnost temperature električnih kontakata od vrednosti primenjene struje | 53 |
| 3.2 Zavisnost maksimalnog ekvivalentnog naprežanja u električnim kontaktima od vrednosti primenjene struje | 55 |
| 3.3 Rezultati optimizacije zakovičastih električnih kontakata | 61 |
| 3.3.1 Masivni Ag kontakti | 61 |
| 3.3.2 Bimetalni kontakti u sistemu sa jednostrukim ograničenjem slobode kretanja | 62 |
| 3.3.3 Bimetalni kontakti u sistemu sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja | 63 |

II Termički prekidači

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Osnovne postavke projektovanja i optimizacije termičkih prekidača | 65 |
| 4.1 | Parametri funkcionalnosti, kvaliteta i pouzdanosti termičkih prekidača . . . | 66 |
| 4.1.1 | Temperaturni parametri | 66 |
| 4.1.2 | Električni parametri | 67 |
| 4.1.3 | Mehanički parametri | 67 |
| 4.2 | Određivanje geometrije i dimenzija termičkih prekidača | 68 |
| 4.3 | Izbor materijala konstrukcionih elemenata termičkih prekidača | 71 |
| 5 | Karakterizacija niskotopivih legura za primenu u termičkim prekidačima | 73 |
| 5.1 | Generisanje 3–D faznih dijagrama trokomponentnih sistema | 73 |
| 5.1.1 | CALPHAD metod | 74 |
| 5.1.2 | Novi metod – metod površinskog modeliranja | 77 |
| 5.1.3 | Likvidus površine trokomponentnih sistema za primenu u termičkim prekidačima | 79 |
| 5.2 | Mikrostrukturalna karakterizacija niskotopivih legura za primenu u termičkim prekidačima | 86 |
| 6 | 3–D simulacija termičkih prekidača u električnom i termičkom domenu | 92 |
| 6.1 | Opis razmatranih termičkih prekidača | 92 |
| 6.2 | Postupak simulacije termičkih prekidača | 93 |
| 6.3 | Raspodele električnih i termičkih veličina unutar termičkih prekidača . . . | 97 |
| 6.4 | Određivanje temperaturnih parametara funkcionalnosti i kvaliteta termičkih prekidača | 102 |
| 6.5 | Optimizacija geometrije i dimenzija termičkih prekidača | 104 |
| 7 | Temperaturni parametri funkcionalnosti i kvaliteta termičkih prekidača tipa S–138 | 111 |
| 7.1 | Termovizijski merni metod | 111 |
| 7.2 | Porast temperature usled elektro–termičkih efekata | 114 |
| 7.3 | Vreme odziva | 116 |
| 7.4 | Temperaturne karakteristike kućišta | 116 |
| | Zaključak | 121 |
| | Dodatak A Opis tehnološkog niza proizvodnje termičkih prekidača | 125 |
| | Publikovani radovi i realizovana tehnička rešenja iz oblasti | 140 |
| | Literatura | 142 |

Abstract

University of Niš, Faculty of Electronic Engineering
Aneta P. Prijić, **Design and Optimization of Electric Contacts and Thermal Cutoffs**
PhD Dissertation

This Dissertation deals with the design and optimization of two kinds of metal based switching devices: i) riveted electrical contacts which are studied in the first part, and ii) S-type thermal cutoffs which are considered in the second part.

Theoretical basis of electric contacts' design given in Chapter 1 is employed for contact material selection, proper set of contacts' geometry and dimension values and minimal contact force determination. Contacts of solid and clad types with rounded head are considered within two supporting structures. 3-D simulation of mechanical, electrical and thermal characteristics of selected contacts in steady state regime is performed and obtained results are presented in Chapter 2. Simulations are carried out in coupled domains by direct method. Special emphasis is given on dependencies of operating temperature and maximum equivalent stress in contacts under various working conditions. On the basis of the obtained results, optimization of riveted electric contacts is realized by appropriate selection of contact material, determination of geometry and dimensions of contacts and definition of rated current values. Optimization was conducted by functional, economic, ecological and reliability points of view. Possibilities of mounting the contacts in specific switching devices with predefined rated currents, as well as number of switching cycles before the failure are outlined. Analyzed dependencies and optimization results are described in detail in Chapter 3.

In Chapter 4 theoretical fundamentals of design and optimization procedures of thermal cutoffs are summarized. Parameters of functionality, quality and reliability of thermal cutoffs are specially considered, since they are crucial for appropriate choice of geometry, dimensions and materials of their constitutive elements.

Thermodynamic and microstructure characterization of low melting alloys for thermal cutoffs purposes are elaborated in Chapter 5. A new method for evaluation of liquidus surfaces of ternary systems is proposed. It is based on standard 3-D surface modeling principles and is applicable for any ternary system whose phase diagrams of binary subsystems and a few appropriate experimental points are known. Liquidus temperature can be determined from 3-D surface by geometrical rules for any arbitrary composition of ternary system. Moreover, the range of compositions of ternary alloys that have desired liquidus temperature can be easily extracted. In this Chapter microstructure characteristics of two eutectic low-melting alloys are also presented. Investigation was performed by SEM and EDS techniques and the obtained results are discussed from thermal cutoffs' technology development point of view.

Chapter 6 concerns results of 3-D electrical and thermal simulation of thermal cutoffs with two cutoff temperatures for rated current of 12 A and rated voltage of 250 V (S-95 and S-138 types). Functional and quality thermal parameters of thermal cutoffs are determined by simulation. Optimization of thermal cutoffs' geometry and dimensions is proposed considering functional, economic and technological aspects.

Results of investigation of electro-thermal characteristics of S-138 industrial prototype thermal cutoffs by thermovision are presented in Chapter 7. On the basis of temperature distributions in cutoffs under different working conditions, temperature rise due to self-heating is registered, cutoff temperature is determined and response time of cutoffs is evaluated. Thermal characteristics of package and conducting elements of cutoffs are also analyzed. Thermal boundary conditions of simulation, which are crucial for successful optimization of cutoffs, are set according to the obtained results.

Topics elaborated in this Dissertation are summarized in Conclusion. As a result of performed design and optimization procedures of thermal cutoffs, technology line for their industrial production is presented. Complete process flow diagram for S-type cutoffs is proposed. It includes preparation and assembling of constitutive elements and quality and reliability testing procedures.

Uvod

Uprkos intenzivnom razvoju poluprovodničkih komponenata namenjenih kontroli električnih kola, prekidačke komponente na bazi metala i njihovih legura još uvek imaju veoma široku, često nezamenljivu primenu. Njihove osnovne konstrukcione elemente predstavljaju električni kontakti koji putem mehaničke akcije ostvaruju funkciju prekida strujnog kola. Zbog toga električni kontakti nalaze široku primenu u uređajima kao što su releji, električni prekidači, termostati, platinska dugmad, starteri motora. U svakodnevnom životu se sreću u prekidačima električnih kućnih instalacija, aparata bele tehnike i snažnim automobilskim relejima, kao i u većini kancelarijskih uređaja i industrijskih postrojenja. Karakteristike električnih kontakata su od interesa za oblast energetike, elektronike i telekomunikacija, a u novije vreme naročito za oblasti auto i avionske industrije. Koriste se za ostvarenje električne veze iz opsega od nekoliko μV i μA , pa do hiljade V i A . Pri tome se neki od električnih kontakata aktiviraju retko, dok drugi treba da izdrže i do $1 \cdot 10^9$ ciklusa kontaktiranja. Samo kontaktiranje se često odvija u sredinama koje pokazuju izraženu hemijsku agresivnost [1].

Funkcionisanje električnih kontakata u okviru raznovrsnih prekidačkih komponenti uslovljava njihove različite geometrije (zakovičasti, krstasti, pravougaoni, u obliku diska, dugmadi, itd.) i dimenzije. Po načinu izrade električni kontakti se klasifikuju kao masivni ili višeslojni. Masivni se u celini izrađuju od visokoprovodnih materijala (najčešće plemenitih metala i njihovih legura), dok se višeslojni kontakti proizvode uglavnom od bakra, s tim što se jedna ili obe kontaktne površine prevlače tankim slojem pogodnog kontaktnog materijala.

Kao osnovni parametri prekidačkih sposobnosti kontakata izdvajaju se električna i termička provodnost, čvrstoća i granica elastičnosti, hemijska reaktivnost, kao i otpornost na habanje, migraciju materijala i eroziju usled lučnog pražnjenja. Pored ovih osobina, koje su određene kontaktnim materijalom, od značaja je razmatranje kontakata sa geometrijskog i tribološkog aspekta, koji su okarakterisani oblikom i dimenzijama kontakata, silom između kontakata, kao i osobinama noseće strukture [2]. Pri projektovanju i optimizaciji električnih kontakata, ključne korake predstavljaju odabir kontaktnih materijala, usvajanje geometrije i dimenzija kontakata i određivanje minimalne sile kontaktiranja.

Da bi se obezbedila zadovoljavajuća funkcionalnost električnih kontakata u okviru projektovanog radnog veka, oni treba da poseduju visoku provodnost i mehaničku čvrstinu, kao i otpornost na degradacione efekte električnog ili hemijskog porekla. Samo predviđanje karakteristika kontakata i vreme njihovog pouzdanog rada pri zadatim radnim uslovima predstavlja složen zadatak zbog toga što ne postoje precizne informacije o svim parametrima koji mogu da utiču na te karakteristike. Korišćenje analitičkih modela za opis karakteristika kontakata pri definisanim radnim uslovima, kao i odgovarajuće statističke aproksimacije omogućavaju sagledavanje nekih aspekata njihove pouzdanosti [3–5]. Numerička simulacija mehaničkih, električnih i termičkih karakteris-

tika obezbeđuje efikasnije postupke projektovanja i optimizacije električnih kontakata. Pri tome je neophodno razmatranje svih dostupnih podataka o uslovima njihove eksploatacije, kako u električnom tako i mehaničkom pogledu [6–8].

Analiza efekata elektro–termičkog zagrevanja električnih kontakata i prekidačkih sklopova metodom konačnih elemenata (engl. Finite Element Analysis – FEA) se može naći u literaturi [6–12]. Razmatranja se uglavnom odnose na izabranu grupu komponenta specificirane geometrije i primenjenih materijala [9], [10]. Domeni analize su dvodimenzionalni [11], dok se uticaj noseće strukture zadaje kroz specifične granične uslove [7]. Mehanički uslovi koji postoje na kontaktima uglavnom se razmatraju zasebno [12] ili kao izdvojeni korak u sekvencijalno spregnutoj analizi [8].

Značajne pokazatelje funkcionalnosti, kvaliteta i pouzdanosti električnih kontakata predstavljaju vrednosti njihove radne temperature u uslovima proticanja nominalne struje i maksimalno ekvivalentno naprezanje pod dejstvom određene sile kontaktiranja. Naime, za električne kontakte se propisuju vrednosti dozvoljenih nadtemperatura u odnosu na datu temperaturu okoline i medijum u kome se kontaktiranje odvija, tako da je poznavanje radne temperature kontakata od značaja za postavljanje maksimalne vrednosti struja kojima se oni mogu opteretiti. S druge strane, istovremeno dejstvo sile kontaktiranja i ekvivalentno elektro–termičko naprezanje u pojedinim oblastima kontakta izazivaju naprezanje koje usled velikog broja ciklusa kontaktiranja dovodi do zamora materijala, a u krajnjem slučaju i do otkaza kontakata. Tako je broj ciklusa kontaktiranja koji još uvek obezbeđuje pouzdan rad kontakta značajan faktor za definisanje njihovog kvaliteta i pouzdanosti.

U prekidačke komponente na bazi metala i njihovih legura ubrajaju se i termički prekidači koji, za razliku od električnih prekidača, poseduju svojstvo neresetovanja. Termički prekidači (termički osigurači) su komponente namenjene zaštiti raznovrsnih električnih uređaja od pregrevanja i/ili samozapaljivanja. Oni detektuju prekomerni porast temperature u uređaju, koji nastaje usled proticanja struje viših vrednosti od nominalne ili usled poremećenih termičkih radnih uslova i nepovratno prekidaju strujno kolo. Njihova prednost u zaštiti uređaja se ogleda u malim dimenzijama, brzom reagovanju, električnoj izolovanosti aktivnog dela i niskoj ceni. Zahvaljujući ovim osobinama termički prekidači nalaze široku primenu u električnim motorima i transformatorima, aparatima bele tehnike, kancelarijskim mašinama, uređajima za osvetljenje i raznovrsnim elektronskim sklopovima. Savremeni trendovi podizanja nivoa bezbednosti rada i rukovanja uređajima nameću prilagođenje termičkih prekidača različitim primenama. Pored postojećih zahteva u pogledu viših nominalnih struja i šireg opsega radnih temperatura, izražena je težnja ka manjim dimenzijama, lakšoj implementaciji, pa čak i ugradnji mogućnosti funkcije strujnog osigurača [13]. Jedina nepogodnost kod primene termičkih prekidača je nemogućnost njihove zamene od strane korisnika uređaja i neophodnost intervencije od strane odgovarajućeg servisnog lica.

Funkcionisanje termičkih prekidača se zasniva na osobini niskotopivih legura koje spajaju provodne delove prekidača da se tope na specificiranoj temperaturi (temperatura prekidanja) čime se raskida veza između ovih delova. Njihova podela je prema konstrukciji, nominalnoj radnoj temperaturi i nominalnoj struji i naponu [14–16]. Na osnovu konstrukcije termički prekidači se razlikuju po načinu prekidanja (sa samosakupljajućim materijalom ili oprugom), po obliku i dimenzijama izvoda (radijalni, aksijalni ili trakasti), kao i po tipu kućišta (keramičko, plastično ili metalno). Nominalna radna temperatura je određena temperaturom topljenja lemne legure i kreće se u opsegu od 70 °C do 240 °C. Nominalne struje i naponi obuhvataju niz AC i DC vrednosti koje definišu radne uslove

termičkih prekidača.

Niskotopive legure su legure čije temperature topljenja ne prelaze 250 °C. Najčešće su višekomponentnog sastava, pri čemu osnovne elemente čine kalaj, olovo ili srebro, dok se niskotopivim elemenata poput bizmuta, indijuma, antimona ili galijuma postiže željena temperatura topljenja. Osim u proizvodnji termičkih prekidača, ove legure nalaze primenu u tehnologiji lemljenja kod uređaja čija se eksploatacija ne odvija u visokotemperaturnim uslovima. Stoga je termodinamička i mikrostrukturna karakterizacija niskotopivih legura od značaja za uspešan razvoj tehnika lemljenja, pre svega u sklopu opštih tendencija odstranjivanja iz upotrebe materijala koji sadrže olovo [17–19].

Razvoj višekomponentnih legura unapred definisanih karakteristika, specificiranje uslova njihove proizvodnje i prognoza ponašanja u eksploatacionim uslovima zahtevaju poznavanje njihovih faznih dijagrama. Faznim dijagramima se vizuelno opisuje stanje materijala u funkciji sastava, temperature i pritiska. Eksperimentalno određivanje faznih dijagrama višekomponentnih legura je dugotrajan, skup i težak proces, zbog čega se prednost daje njihovom modeliranju. Kod trokomponentnih sistema fazni dijagrami pri konstantnom pritisku su trodimenzionalnog karaktera, ali se najčešće prikazuju u dvodimenzionalnoj formi. Naime, likvidus i solidus površine predstavljaju se u vidu projekcija izotermnih i kotektičkih linija unutar trougla na čijim stranicama se nalaze hemijski sastavi dvokomponentnih podsistema. Proračun termodinamičkih parametara višekomponentnih legura i generisanje njihovih faznih dijagrama je glavni interes tzv. CALPHAD (CALculation of PHAse Diagrams) grupe tokom poslednje tri decenije [20].

CALPHAD metod određivanja ravnoteže faza u višekomponentnim sistemima se zasniva na minimizaciji ukupne slobodne *Gibbs*-ove energije. Zavisnost ove energije od temperature, pritiska i koncentracije pojedinih faza se opisuje izabranim matematičkim modelima, čiji se parametri ekstrahuju uz pomoć odgovarajućeg softvera, a na osnovu baza termodinamičkih podataka. Na ovaj način se uz pomoć faznih dijagrama podsistema nižeg reda generišu fazni dijagrami sistema višeg reda. Međutim, postojeće baze termodinamičkih podataka, kao i softveri specijalizovani za generisanje prostornih dijagrama su komercijalnog karaktera, te nisu javno dostupni.

Parametri funkcionalnosti, kvaliteta i pouzdanosti termičkih prekidača obuhvataju termički, električni i mehanički domen. Nominalna radna temperatura i temperatura držanja su osnovni parametri termičkih prekidača definisane konstrukcije, pri datim vrednostima nominalne struje i eksploatacione temperature i od primarnog su značaja za korektnu implementaciju termičkih prekidača. Kvalitet i pouzdanost termičkih prekidača su definisani parametrima poput porasta radne temperature usled elektrotermičkih efekata i vremena odziva. Porast radne temperature je određen karakteristikama provodnih elemenata i termičkim osobinama kućišta prekidača. Vreme odziva se specificira pri određenim laboratorijskim uslovima ispitivanja termičkih prekidača i uglavnom zavisi od termičkih osobina njegovih konstitutivnih elemenata. Vrednosti ovih parametara se prvenstveno razmatraju u postupcima projektovanja i optimizacije termičkih prekidača, kojima se obezbeđuje adekvatan izbor materijala, geometrije i dimenzija konstrukcionih elemenata. U tu svrhu se koristi odgovarajuća FE analiza električnih i termičkih karakteristika prekidača.

Eksperimentalno praćenje raspodele temperature u okolini i unutar termičkih prekidača pri promenljivim električnim i termičkim uslovima rada omogućava određivanje njihovih temperaturnih parametara funkcionalnosti i kvaliteta. Upotreba termovizijske kamere predstavlja jedan od efikasnih metoda snimanja raspodele temperature i ima široku primenu u oblasti medicine, meteorologije, energetike, termotehnike, tribologije

i nauke o materijalima [21–23]. U domenu elektronike termovizijska snimanja se koriste za analizu raspodele toplote u raznovrsnim pasivnim i aktivnim komponentama i uređajima [24, 25], a samim tim njihova primena je moguća i kod termičkih prekidača. Iako su termovizijske merne metode pre svega usmerene na funkcionalna ispitivanja, a tek u manjem broju na kvantitativna izračunavanja termičkih veličina [26], njihova prednost se ogleda u beskontaktnom, nedestruktivnom merenju temperature ispitivanog uređaja i pojedinih njegovih delova. U slučaju termičkih prekidača ovom metodom je izbegnuto korišćenje specijalizovanih komora za regulaciju temperature i omogućeno funkcionisanje prekidača u radnim uslovima bliskim realnim.

U ovoj disertaciji se, na osnovu prekidačke komponente koju detaljno obrađuje, izdvajaju dve celine. U prvom delu disertacije su predstavljeni rezultati postupaka projektovanja i optimizacije električnih kontakata zakovičastog oblika. Razmatranjima su obuhvaćeni kontakti masivnog i bimetalnog tipa u okviru dve noseće strukture. Na osnovu teorijskih postavki projektovanja električnih kontakata kojima se detaljno bavi glava 1 izabrani su kontaktni materijali, određena geometrija i dimenzije kontakata i definisana vrednost minimalne sile kontaktiranja. Za izabrane kontakte izvršena je 3–D simulacija njihovih mehaničkih, električnih i termičkih karakteristika pri stabilnim uslovima napajanja i dobijeni rezultati su prikazani u glavi 2. Realizovan je direktan postupak simulacije u spregnutim domenima, a poseban akcenat je stavljen na zavisnost radnih temperatura i maksimalnog ekvivalentnog naprežanja u kontaktima od uslova eksploatacije. Na osnovu dobijenih rezultata izvršena je optimizacija zakovičastih električnih kontakata u pogledu izbora kontaktnog materijala, vrednosti geometrijskih i dimenzionih parametara dizajna i definisanih vrednosti nominalne struje. Pri tome su razmatrani funkcionalni, ekonomski, ekološki i aspekti pouzdanosti. Istovremeno su naznačene mogućnosti primene usvojenog tipa kontakata u željenim prekidačkim sklopovima sa unapred definisanim nominalnim strujama i brojem kontaktiranja do otkaza. Analizirane zavisnosti i rezultati optimizacije su detaljno predstavljeni u glavi 3.

Drugi deo disertacije je posvećen projektovanju i optimizaciji termičkih prekidača S tipa. U glavi 4 su obrađene teorijske postavke ovih postupaka sa posebnim osvrtom na parametre funkcionalnosti, kvaliteta i pouzdanosti kao osnov za adekvatan izbor geometrije, dimenzija i materijala konstrukcionih elemenata termičkih prekidača.

U glavi 5 su izloženi rezultati termodinamičke i mikrostrukturne karakterizacije niskotopivih legura za primenu u termičkim prekidačima. Detaljno je opisan novi metod određivanja likvidus površina trokomponentnih sistema kojima pripadaju i mnoge niskotopive legure. Metod se bazira na poznavanju faznih dijagrama binarnih podistema i minimalnog seta eksperimentalnih tačaka, a kao softverski alat koristi neki od programa za površinsko modeliranje. Generisani 3–D fazni dijagrami omogućavaju ekstrahovanje temperature likvidusa za zadati sastav trokomponentnog sistema, ali i određivanje sastava legura koji zadovoljavaju postavljeni kriterijum maksimalne temperature topljenja. Takođe, prikazani su rezultati mikrostrukturne analize dveju eutektičkih legura značajnih za primenu u termičkim prekidačima. Time je omogućeno specificiranje uslova njihovog procesiranja, kao i predviđanje mehaničkih karakteristika od njih realizovanih lemnih spojeva.

Deo disertacije obuhvaćen glavom 6 posvećen je rezultatima 3–D električne i termičke simulacije termičkih prekidača dveju temperatura prekidanja, nominalne vrednosti struje 12 A i nominalnog napona 250 V (prekidači tipa S–95 i S–138). Na osnovu simulacijom određenih vrednosti temperaturnih parametara funkcionalnosti i kvaliteta termičkih prekidača, predložena je njihova optimizacija po pitanju geometrije i dimen-

zija. Pri tome su sagledani funkcionalni, ekonomski i tehnološki aspekti.

U glavi 7 su dati rezultati termovizijskog ispitivanja elektro-termičkih karakteristika termičkih prekidača tipa S-138 realizovanih u obliku industrijskog prototipa. Na osnovu raspodele temperature u njima pri različitim radnim uslovima utvrđen je porast radne temperature usled efekata samozagrevanja, precizirana temperatura prekidanja i procenjeno vreme odziva termoprekidača. Razmatrane su i termičke osobine kućišta i provodnih elemenata prekidača. Dobijeni rezultati su iskorišćeni za postavljanje graničnih termičkih uslova neophodnih za uspešnu optimizaciju prekidača kroz postupak simulacije njihovih električnih i termičkih karakteristika.

Najznačajniji rezultati obrađeni u ovoj disertaciji su sumirani u zaključku. Pri tome je, kao rezultat sprovedenih postupaka projektovanja i optimizacije termičkih prekidača, prikazan tehnološki niz i predložena kompletna linija za njihovu proizvodnju. Dat je dijagram toka tehnološkog niza proizvodnje termičkih prekidača S tipa sa specificiranim koracima pripreme i sklapanja sastavnih elemenata i postupcima ispitivanja kvaliteta i pouzdanosti.

Deo I

Električni kontakti

Glava 1

Osnovne postavke projektovanja i optimizacije električnih kontakata

Uloga električnih kontakata je da prenose električnu struju ili signale sa jedne komponente na drugu, a da pri tom unose što manju izmenu signala. Postupci projektovanja i optimizacije kontakata treba da obezbede efikasan i pouzdan rad kontakata u toku predviđenog radnog veka. Za ostvarenje tih zahteva kontakti treba da poseduju visoku električnu i termičku provodnost, otpornost na habanje i pojavu električnog luka, kao i hemijsku stabilnost. Ove karakteristike kontakata su određene osobinama primenjenog kontaktnog materijala, njihovim oblikom i dimenzijama i silom između kontakata [27].

Loše projektovani kontakti, osim loše funkcionalnosti, mogu tokom vremena da izgube deo svoje prenosne moći. Uzroci degradacije osobina kontakata imaju kombinovano električno, mehaničko i hemijsko poreklo i uslovljeni su radnim uslovima kontakata. Pri tome, radne uslove određuju vrednost struje koju provode, temperatura i hemijska agresivnost sredine u kojoj funkcionišu i osobine noseće strukture, odnosno mesto njihove ugradnje.

Uzimajući u obzir sve parametre koji definišu funkcionalnost i pouzdanost električnih kontakata, ključne korake u postupku njihovog projektovanja i optimizacije predstavljaju odabir kontaktnih materijala, usvajanje geometrije i dimenzija kontakata i određivanje minimalne sile kontaktiranja.

1.1 Parametri funkcionalnosti, kvaliteta i pouzdanosti električnih kontakata

Signalu koji prolazi kroz kontakte suprotstavlja se električna otpornost kontakta tako da se deo snage signala pretvara u *Joule*-ovu toplotnu energiju. Zbog toga je *električna otpornost kontakta* osnovni parametar njegove funkcionalnosti i neophodno je da bude što manja. Ukupna otpornost kontakta sastoji se od otpornosti tela kontakta i otpornosti kontaktiranja. *Otpornost tela kontakta* je konstantna vrednost, koja zavisi od električne provodnosti materijala od kojeg je kontakt izrađen i njegovog oblika i dimenzija i može se smanjiti izborom visokoprovodnih materijala. *Otpornost kontaktiranja* je promenljiva veličina, koja zavisi od spoja dveju površina koje se kontaktiraju. Ova otpornost se može smanjiti izborom viših vrednosti normalnih sila koje postoje između površina koje se kontaktiraju, odnosno viših vrednosti sila kontaktiranja [28].

S obzirom da se u kontaktima pri proticanju struje oslobađa toplota neophodno je

obezbediti njeno odvođenje sa mesta kontaktiranja. Stoga je *termička provodnost* drugi parametar funkcionisanja kontakata koji ima značaj pri njihovom projektovanju. Termička provodnost kontakta je određena koeficijentom termičke provodnosti kontaktnog materijala, načina odvođenja i veličine površina sa kojih se toplota odvodi i poželjno je da ima što veću vrednost. Izborom kontaktnih materijala visokog koeficijenta termičke provodnosti i oblika kontakta koji obezbeđuje značajne slobodne površine postižu se bolje termičke karakteristike kontakata.

Tokom svoje eksploatacije električni kontakti su izloženi visokim vrednostima električne struje, čestim i mnogobrojnim ciklusima uključivanja i isključivanja, kao i hemijski agresivnim sredinama. Kao posledica ovakvih radnih uslova dolazi do oštećenja usled kojih karakteristike kontakata tokom vremena degradiraju, a u krajnjem slučaju dolazi do njihovog otkaza. Određivanje pouzdanosti kontakata predstavlja složen problem zbog nepostojanja preciznih informacija o svim parametrima koji mogu da utiču na njihove karakteristike pri različitim radnim uslovima.

1.1.1 Uzroci degradacije električnih kontakata

Osnovne fizičke i hemijske pojave koje nastaju u kontaktima i predstavljaju uzrok degradacionih efekata su porast radne temperature, elektro–lučno pražnjenje, hemijska reaktivnost i zamor materijala. Degradacioni efekti ograničavaju mogućnost dugotrajne i pouzdane primene projektovanih električnih kontakata i mogu se posmatrati sa električnog i mehaničkog aspekta. Efekti električnog karaktera su:

- povećanje otpornosti kontakata (usled mnogobrojnih termičkih pojava i hemijske reaktivnosti);
- neprilagođenost impedanse dve kontaktne polovine;
- generisanje elektromagnetnih smetnji,

dok u efekte mehaničkog karaktera spadaju:

- habanje (prenos materijala usled slepljivanja, isparavanje materijala, erozija usled lučnog pražnjenja i korozije);
- zavarivanje (usled visokih gustina električne struje i lučnog pražnjenja);
- izmenjen oblik kontakata (pukotine, plastična deformacija).

Veličina degradacije karakteristika kontakata koja nastaje pri svakom ciklusu kontaktiranja u osnovi zavisi od kontaktnog materijala i oblika i dimenzija kontakta, ali i više faktora koji uključuju nominalnu vrednost struje, dužinu trajanja električnog luka, veličinu i sredinu unutar kontaktnog procepa, brzinu kontaktiranja, naprezanje prilikom kontaktiranja i broj odskakivanja pri zatvaranju [29]. Takođe, mnogi od efekata degradacije su prouzrokovani istovremenim dejstvom više pojava, koje su često međusobno indirektno povezane tako da je za umanjeње negativnih posledica potrebno uravnoteženje više faktora vezanih za dizajn kontakata.

Porast radne temperature

Radna temperatura kontakata ima značajan uticaj na njegove karakteristike u mehaničkom i električnom domenu. Porast radne temperature pri proticanju struje definiše

maksimalnu vrednost struje koju kontakt specificirane geometrije i kontaktnog materijala može da provodi određeni vremenski period, a da pri tom ne dođe do degradacije njegovih karakteristika. Ova vrednost predstavlja *nominalnu vrednost struje* i jedan je od osnovnih parametara pri projektovanju električnih kontakata. U prvom trenutku procesa zatvaranja kontakata, ukoliko sile kontaktiranja imaju nisku vrednost, dolazi do klizanja i/ili odskakivanja kontakata te često kroz kontakt protiče struja vrednosti znatno više od nominalne. Ova struja je *inraš struja* i uzrokuje lokalno izraženo povišenje radne temperature koje je razlog nastajanja prenosa materijala i isparavanja kontakata [27].

Vrednost radne temperature kontakata sadrži tri komponente: temperaturu okoline, porast temperature usled otpornosti kontaktiranja i porast temperature usled otpornosti tela kontakata. Porast temperature usled otpornosti kontaktiranja je teorijski nemoguće precizirati jer zavisi od oblika kontakata, tvrdoće, električne i termičke otpornosti kontaktnih materijala, vrednosti sile kontaktiranja, debljine sloja oksida na kontaktnim površinama, kao i klizanja kontaktnih površina pri kontaktiranju. Porast temperature T usled otpornosti tela kontakata je proporcionalan kvadratu jačine struje koja protiče kroz kontakt I i u najjednostavnijem obliku se može predstaviti izrazom [30]:

$$\Delta T = \frac{I^2 L^2}{2\sigma k A^2}, \quad (1.1)$$

gde je L dužina provodnog puta kroz kontakt, A poprečni presek kontakata, σ specifična električna provodnost i k termička provodnost kontaktnog materijala. Ovaj izraz pretpostavlja više pojednostavljenja same strukture kontakata i osnovnih fizičkih procesa u njima: spoj se ostvaruje između kontakata jednakih dužina i poprečnog preseka; termička energija se stvara konstantnom brzinom unutar tela kontakata, dok je otpornost kontaktiranja zanemariva; ne postoji odavanje toplote putem konvekcije ili radijacije tako da se ona provodi kroz telo kontakata do njegovih fiksiranih krajeva i tu apsorbira; maksimalna temperatura postoji na kontaktnim površinama. Veliki broj pretpostavki nameće upotrebu ovog izraza više sa ciljem poređenja različitih materijala, a ne u smislu predviđanja kvantitativnih vrednosti. Zavisnosti veličina u izrazu (1.1) potvrđuju navedene postavke da materijali sa boljom provonošću (kako u električnom tako i termičkom pogledu) obezbeđuju bolje funkcionisanje kontakata. Osim toga, ovakvi materijali dozvoljavaju tanje i uže poprečne preseke i manje dimenzije kontakata što ima značaja sa aspekta ekonomske isplativosti izrade kontakata [31].

Između veličina koje određuju dizajn kontakata, osobina kontaktnih materijala i osnovnih parametara funkcionalnosti kontakata postoji složena međusobna interakcija. Ova dinamička interakcija je prikazana kroz porast radne temperature na slici 1.1. Prikazan je uticaj određene promenljive na drugu, pri čemu ukoliko porast prve izaziva ili dozvoljava porast druge promenljive kraj strelice stoji znak plus, dok znak minus stoji ukoliko porast prve izaziva ili dozvoljava smanjenje druge veličine. Povišena temperatura dovodi do porasta otpornosti tela kontakata usled povećanja specifične električne otpornosti materijala. Istovremeno, termičko širenje materijala kao i smanjenje napregnutosti u kontaktnom materijalu sa vremenom daju izmenjenu vrednost sile kontaktiranja koja indirektno povećava otpornost kontaktiranja. U mehaničkom pogledu termičko širenje stvara dodatno naprezanje na mestima spoja kontakata i noseće strukture. Porast temperature izaziva i ubrzano stvaranje korozivnih slojeva na kontaktnim površinama i povećanje otpornosti kontaktiranja. Svi ovi efekti su međusobno povezani i zavise od više faktora poput oblika kontakata, vrste kontaktnih materijala, sredine u kojoj se vrši kontaktiranje.

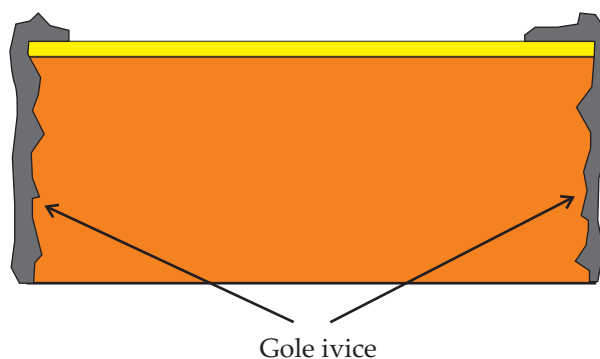
Odskakivanje kontakata prilikom zatvaranja dovodi do višestrukog lučnog pražnjenja, tako da je u cilju smanjenja oštećenja kontakata neophodno smanjiti broj i visinu odskakivanja izborom odgovarajuće noseće strukture [35]. Kontrolisanje oštećenja usled lučnog pražnjenja prilikom otvaranja kontakata se ostvaruje smanjenjem trajanja električnog luka bržim povećanjem rastojanja između kontaktnih površina. Međutim, ubrzano povećanje kontaktnog procepa dovodi do povećanja odskakivanja kontakata, tako da je potrebno naći kompromis između ova dva efekta.

Smanjenje negativnih efekata usled lučnog pražnjenja se, osim navedenim načinima, postiže i adekvatnim izborom kontaktnih materijala otpornim na razjedaње električnim lukom i habanje [36].

Hemijska reaktivnost

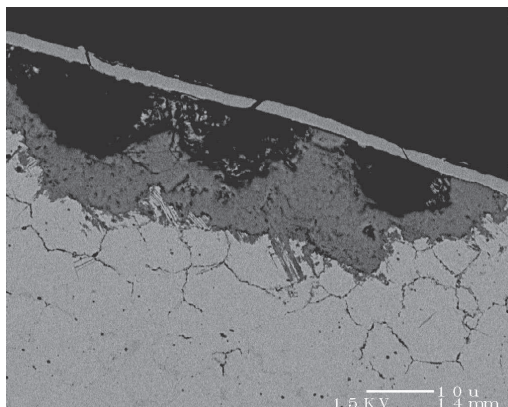
Na mestima na kojima kontakti dolaze u dodir sa hemijski agresivnom sredinom, može doći do stvaranja neprovodnih slojeva na površini, što za posledicu ima degradaciju kontaktnog sloja i povišenje kontaktne otpornosti. Ova pojava je poznata kao proces korozije. Najčešći hemijski aktivatori korozije su kiseonik (stvaranje oksida), različita sumporna, hlorna i silicidna jedinjenja, kao i organske materije. Neki metali su podložni samo–ograničavajućoj ili tzv. *pasivnoj koroziji*. U ovom procesu jednom formirani sloj oksida ili sulfida ne narasta dalje već štiti osnovni materijal od uticaja atmosfere. Kod *aktivne korozije* osnovni materijal neprestano korodira i proizvod korozije se širi od početnog mesta nastajanja. Kod kontakata se najčešće javljaju tri vida korozije: prostiruća, kroz pore i korozija vibriranja [29, 37–39].

Prostiruća korozija se javlja kod kontakata prevučених заштитним slojem, a kod kojih postoje gole ivice koje su u dodiru sa atmosferom. Ova korozija je šematski prikazana na slici 1.2 gde se korozioni sloj sa golih bočnih ivica širi preko površine prevlake i tako povećava otpornost kontaktiranja. Problem prostiruće korozije se rešava nanošenjem materijala prevlake nakon postupka isecanja tela kontakta, čime se eliminišu gole ivice, ili nanošenjem dodatnog međusloja nekorodirajućeg materijala između tela kontakta i prevlake.



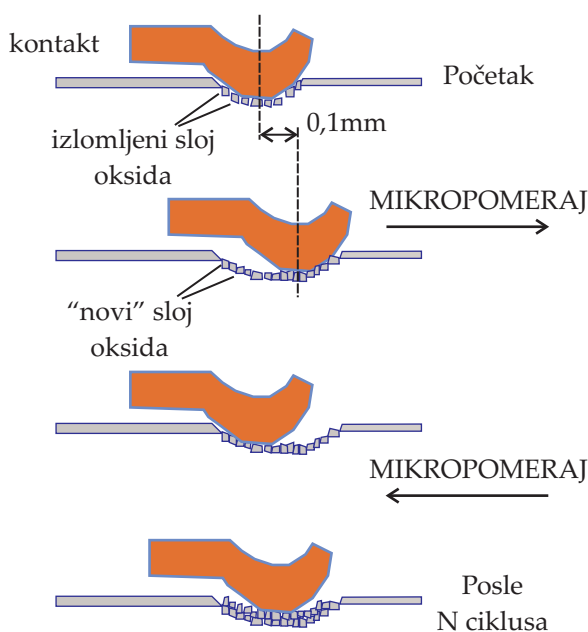
Slika 1.2: Prostiruća korozija koja potiče od golih ivica [38].

Sloj prevlake često sadrži nesavršenosti poput pora ili pukotina. Ukoliko je osnovni materijal kroz ove mikro otvore izložen korozionoj sredini, dolazi do pojave *korozije kroz pore* [40]. Korozija osnovnog materijala može da se odvija unutar pora, tako da je nevidljiva na površini, ali može da ima i prostirući karakter. Na slici 1.3 je prikazan primer korozije kroz pore koja je dovela do značajnog oštećenja osnovnog materijala. Efekat korozije kroz pore se umanjuje nanošenjem debljeg sloja prevlake ili, kao kod prostiruće korozije, nanošenjem dodatnog međusloja.



Slika 1.3: Korozija osnovnog materijala kroz pore/pukotine u sloju prevlake [38].

Kod kontakata sa slojem prevlake gde postoji oscilovanje tačke kontaktiranja na mikroskopskoj skali kontaktni sloj biva degradiran takozvanom *korozijom vibriranja* [41]. Ovaj proces nastaje usled brojnih kontaktiranja koja dovode do formiranja debljeg sloja oksida u okolini tačke kontaktiranja koja nije strogo fiksirana i šematski je prikazan na slici 1.4. Efekat korozije vibriranja se može otkloniti definisanjem dovoljno visoke vrednosti sile kontaktiranja koja će obezbediti fiksiranu tačku kontaktiranja ili podmazivanjem kontaktnih površina čime se zaustavlja oksidacija i smanjuje habanje [42, 43].

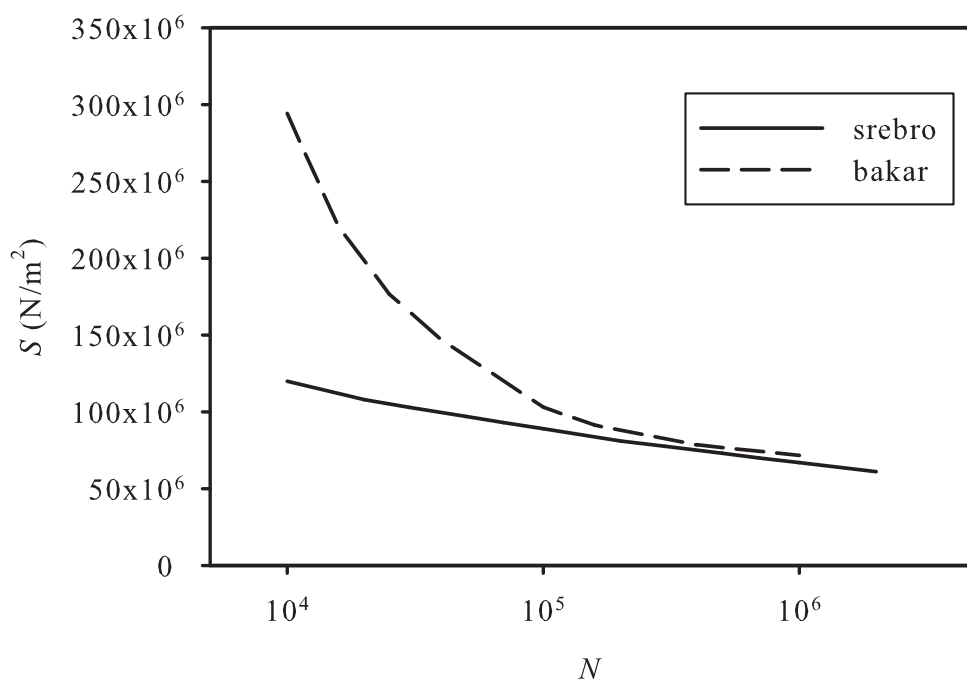


Slika 1.4: Nastajanje korozije vibriranja [37].

Zamor materijala

Udarna energija koja se oslobađa prilikom zatvaranja kontakata dovodi do naprezanja materijala kontaktnih površina, tako da prilikom višestrukih ciklusa uključivanja i isključivanja na kontaktnim površinama mogu da nastanu pukotine usled zamora materijala. Porast broja i dimenzija ovih pukotina tokom vremena dovodi do oštećenja kontaktnih površina [29]. Otkazi usled zamora materijala nastaju iznenada i odgovorni su za skoro 90 % otkaza koji se javljaju u metalima. Nastaju pri znatno nižim vrednostima naprezanja u odnosu na statičko opterećenje kontaktnih materijala.

Rezultati testova zamora materijala se prikazuju na takozvanim S–N krivama i predstavljaju zavisnost maksimalnog naprezanja (S) i broja primenjenih ciklusa opterećenja do pojave otkaza usled zamora ispitivanog materijala (N). Za srebro i bakar (dva osnovna materijala u izradi kontakata) S–N krive su prikazane na slici 1.5. Na osnovu ovakvih zavisnosti se određuju *čvrstoća na zamor materijala* (vrednost naprezanja pri kojoj materijal otkazuje posle specificiranog broja ciklusa opterećenja) i *životni vek usled zamora* (broj ciklusa opterećenja koji izaziva otkaz materijala pri konstantnoj vrednosti naprezanja). U postupku projektovanja kontakata ova dva parametra omogućavaju zadavanje sile kontaktiranja za traženi životni vek ili procenu vremena pouzdanog rada kontakata pri datom ekvivalentnom opterećenju.



Slika 1.5: S–N krive za srebro i bakar [44], [45].

Čvrstoća na zamor materijala je vezana za čvrstoću materijala i zavisi od njegovih mikrostrukturnih karakteristika (veličine zrna, rastegljivosti), načina površinske obrade i mogućnosti pojave korozije. Spoljašnji parametri naprezanja (temperatura, frekvencija i srednja vrednost opterećenja) takođe utiču na zamor materijala. Otpornost na zamor materijala određene komponente se može povećati poboljšanjem njenog dizajna, modifikovanjem načina proizvodnje, upotrebom materijala više granice čvrstoće i površinskim očvršćavanjem komponente [46].

1.2 Tolerancije pri projektovanju

Pri projektovanju električnih kontakata treba uzeti u obzir tri vrste tolerancija: tolerancije materijala, tolerancije u procesu proizvodnje i tolerancije sistema u koji se kontakti ugrađuju. Dodatno, tolerancije mogu da se međusobno superponiraju i na taj način određuju takozvane sjedinjene tolerancije.

Tolerancije materijala se vezuju za neobrađeni materijal i obično su specificirane od strane proizvođača. Parametri materijala poput modula elastičnosti, granice plastič-

nosti, čvrstoće, tvrdoće, provodnosti, deformabilnosti i slični ili zauzimaju određeni opseg ili zadovoljavaju set minimalnih vrednosti. Pri projektovanju kontakata primenom analize konačnim elementima ili nekim drugim metodom obično se usvajaju prosečne vrednosti parametara materijala. Takođe, varijacije dimenzija trakastog materijala od kog se izrađuju kontakti (debljina, širina, dužina) utiču na njegove karakteristike.

Tolerancije u procesu proizvodnje se specificiraju tehničim crtežima delova. Ovime se obezbeđuje delimična kontrola nad konačnim oblikom kontakata posle raznovrsnih postupaka kojima su izloženi prilikom izrade. Naime, delovi izrađeni u procesu masovne proizvodnje mogu da pokazuju osobine drugačije od onih izrađenih u prototipovima alata. Uzroci su obično različiti postupci oblikovanja, isecanja i obrade kontaktnih materijala [47], [48]. Vrednosti zaostale napregnutosti koja postoji u kontaktima nakon procesa valjanja i izvlačenja provodnih listova i procesa isecanja razlikuju se od kontakta do kontakta zavisno od primenjenog materijala, njegove termičke obrade i načina procesiranja. Ove razlike unose i razlike u ponašanje kontakata prilikom eksploatacije. S obzirom da projektanti pretpostavljaju optimalne vrednosti dimenzija i parametara materijala, tolerancije se koriste sa ciljem da nijedna karakteristika kontakta ne odstupa značajno od optimalne vrednosti.

Tolerancije sistema nameće proizvođač krajnjeg uređaja. One obično uključuju tolerancije dimenzija i položaja delova koji se sklapaju, kao i tolerancije u zadovoljenju električnih karakteristika (impedanse) delova. Zadane vrednosti utiču na tolerancije pojedinačnih komponenti, tako da se dimenzije delova moraju specificirati sa težnjom da zadovolje tolerancije sistema.

Uopšteno, ukoliko su sve tolerancije zadovoljene komponenta će funkcionisati u okviru zahtevanih vrednosti. Međutim, i dalje postoji mogućnost da međusobna interakcija odstupanja dovede do nepravilnog funkcionisanja kontakata. To je opisano takozvanim *sjedinjenim tolerancijama*. Dolazi se do zaključka da su uske tolerancije dimenzija neophodne za ispravan rad kontakata.

1.3 Izbor kontaktnih materijala

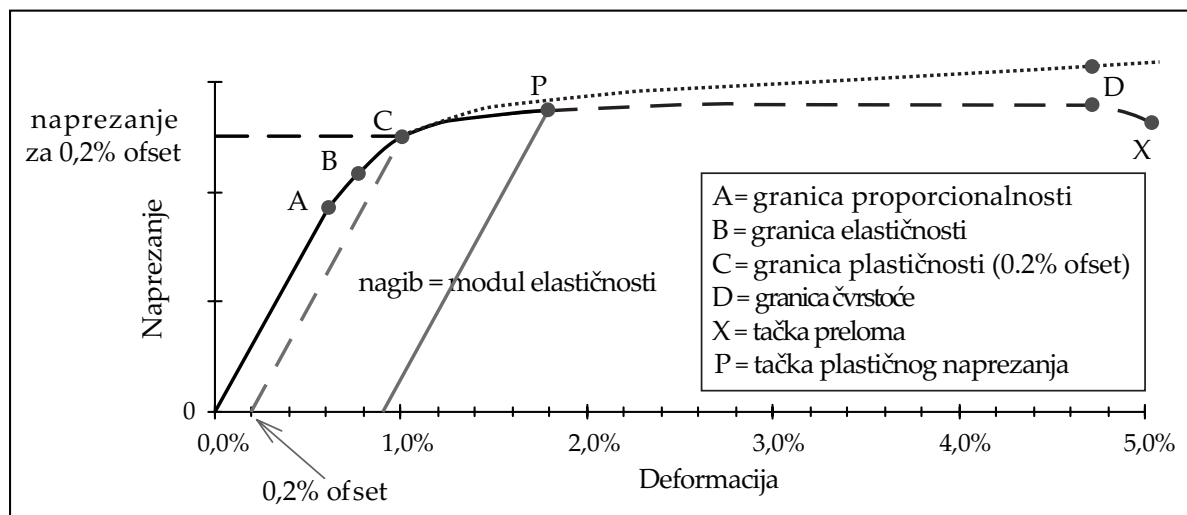
Razvoj kontaktnih materijala iskazuje težnju dobijanja ekonomski isplativih materijala koji obezbeđuju pouzdan rad kontakata uz postojanje odličnih karakteristika kontaktiranja i zadovoljenje ekološke podobnosti. Poboljšanja u osobinama materijala sa mehaničkog i električnog aspekta su upravljana postizanjem boljih karakteristika u specificiranim primenama materijala. Kod kontakata za prenos malih snaga najznačajnija osobina je vrednost otpornosti kontakta, dok je kod kontakata koji ostaju u zatvorenom stanju duži vremenski period značajnija stabilnost ove vrednosti u toku radnog veka. Za primene u prenosu velikih snaga od primarnog značaja su otpornost na lučno pražnjenje i zavarivanje [49].

U cilju očuvanja dobrog električnog kontakta često se površina kontakta prevlači tankim slojem drugog materijala. Obično je osnovni materijal kontakta bakar dok izabrani materijal za prevlaku mora da ima visoku provodnost, tvrdoću, da je otporan na koroziju i povišenu temperaturu i da lako prijanja za bakar. Time se umanjuje formiranje korozionog sloja na kontaktnim površinama, povećava otpornost na habanje i prenos materijala usled lučnog pražnjenja ili smanjuje trenje kod kliznih kontakata. Kao kontaktni sloj se koriste različiti visokoprovodni ili plemeniti metali i njihove legure, kao i sinterovana sjedinjenja. Najčešće korišćeni metali su srebro, zlato, kalaj, nikl, bakar, platina, paladijum,

volfram i, u novije vreme, berilijum, ugljenik, hrom i kobalt. Materijali za kontakte se izrađuju dodavanjem metala (Cu, W, Ni, C) ili keramičkih materijala (SnO_2 , In_2O_3 , ZnO, CdO) osnovnom metalu postupkom termičkog legiranja ili sinterovanja. Za prevlačenje kontakata se koristi više tehnika poput elektroprevlačenja, autokatalize, mehaničkog prevlačenja, metoda toplog kupatila. Sam proces prevlačenja može da se vrši u različitim fazama fabrikovanja kontakata (pre, u toku ili posle isecanja), pri čemu svaki postupak ima određene prednosti i mane. Izbor materijala, tehnike legiranja i momenta primene u toku proizvodnje kontakata zavise od primarnog zahteva koji kontaktni sloj treba da ispuni [29].

1.3.1 Mehanički aspekt izbora kontaktnih materijala

Uprkos detaljnom i pažljivom procesu projektovanja, komponente mogu da otkazu usled više uzroka. Najčešći uzrok otkaza komponenti vezan za teorijske postavke projektovanja leži u razlici između definicije granice elastičnosti i 0,2% ofseta deformacije datog materijala. Čvrstoća materijala se obično određuje testovima istežanja koji daju zavisnost naprezanje – deformacija datog materijala. Ova kriva ima ključnu ulogu u procesu izbora materijala pri projektovanju kontakata imajući u vidu mehanički aspekt i njen osnovni oblik kod metala je dat na slici 1.6



Slika 1.6: Zavisnost deformacije od naprezanja pri testovima na istežanje [50].

Naprezanje predstavlja vrednost sile istežanja po jedinici površine poprečnog preseka uzorka koji se ispituje, dok je vrednost deformacije jednaka relativnoj promeni dužine uzorka. Do tačke A postoji linearna zavisnost između naprezanja S i deformacije ϵ oblika $S = E_m \epsilon$ pri čemu je koeficijent proporcionalnosti E_m jednak modulu elastičnosti (*Joung*–ovom modulu) metala. Tačka B predstavlja granicu elastičnosti i deli krivu naprezanje – deformacija na oblast elastičnog naprezanja (levo od tačke B) i oblast plastičnog naprezanja (desno od tačke B). Ukoliko se metal izlaže naprezanju ispod granice elastičnosti, po ukidanju istežanja on se vraća u prvobitno stanje po istoj zavisnosti naprezanje – deformacija. Analogno, ukoliko je naprezanje iznad granice elastičnosti (npr. do tačke P) nakon prestanka istežanja zavisnost naprezanje – deformacija prati krivu paralelnu prvobitnoj, s tim što postoji trajna deformacija materijala. Povećanjem naprezanja dolazi se do tačke D – takozvane granice čvrstoće, a zatim i do tačke preloma metala. Tokom eksploatacije kontakata ne bi trebalo da dolazi do njihove trajne

deformacije, tako da se pri projektovanju mora uzeti u obzir granica naprezanja koju odgovarajući materijal može da toleriše. Obično je to 0,2% ofset deformacije materijala (tačka C). Pri ovoj vrednosti naprezanja u materijalu nakon njegovog ukidanja ostaje trajna deformacija uzorka za vrednost od 0,2%. Ova granica se naziva *granica plastičnosti (tečenja)* datog materijala. Međutim, za vrednosti naprezanja u kontaktima ispod 0,2% ofseta već postoji trajna deformacija, tako da dizajn koji teorijski ispunjava zahteve, u realnosti može da pokazuje neželjene karakteristike.

Pri istezanju ili sabijanju uzorka materijala dolazi do promene prvobitne površine njegovog poprečnog preseka. Usled toga stvarna vrednost naprezanja u uzorku je složenija funkcija sile istezanja (sabijanja) i poprečnog preseka uzorka. Realna kriva zavisnosti naprezanja i deformacije iznad granice plastičnosti je prikazana tačkastom linijom na slici 1.6. Celokupna stvarna kriva zavisnosti naprezanje – deformacija se može predstaviti takozvanom bilinearnom aproksimacijom, odnosno dvema pravim linijama koje se spajaju u tački granice plastičnosti. Nagib prve linije je jednak *modulu elastičnosti*, dok druga linija spaja tačku granice plastičnosti sa tačkom granice čvrstoće i njen nagib je određen *tangentnim modulom*. U programima za strukturalnu analizu metodom konačnih elemenata mehaničke osobine materijala se u slučaju *linearne elastične analize* opisuju modulom elastičnosti i Poisson-ovim koeficijentom (odnosom deformacije materijala u tangentnom i longitudinalnom pravcu pri dejstvu naprezanja). Sa druge strane u strukturalnoj *nelinearnoj analizi* koristi se ili cela kriva naprezanje – deformacija ili njena bilinearna aproksimacija [51].

Za postizanje odgovarajuće vrednosti sile kontaktiranja poželjno je izabrati materijal koji podnosi što višu vrednost napregnutosti, a da pri tom naprezanje još uvek ima elastični karakter. Ovo zahteva materijal sa optimalnom kombinacijom modula elastičnosti i granice plastičnosti. Na slici 1.6 je prikazana stvarna granica elastičnosti metala (tačka B) koja deli oblasti elastičnog i plastičnog deformisanja. Međutim, ukoliko se kontakt napreže u elastičnoj oblasti pod uticajem povišene temperature dovoljno dugo, deo elastične deformacije može da pređe u plastičnu. Dodatno, vrednost plastičnog deformisanja sa vremenom raste usled postupnog povećanja deformacije pod dejstvom konstantne vrednosti naprezanja i smanjene mogućnosti materijala da se vrati u prvobitno stanje pri ukidanju naprezanja (smanjenje napregnutosti). Oba ova efekta su izraženija pri višim početnim vrednostima napregnutosti i temperatura. Stoga, dobro projektovani kontakti moraju da uzimaju u obzir i termičke efekte, kao i efekte smanjenja napregnutosti tokom vremena [52], [53].

Nastajanje trajne deformacije materijala pri dejstvu određene vrednosti naprezanja se povećava sa temperaturom usled povećane pokretljivosti dislokacija unutar zrna u materijalu. Granice zrna zaustavljaju kretanje dislokacija tako da materijali sa sitnijom strukturom zrna imaju višu granicu plastičnosti. Osim toga, sitnozrni materijali pokazuju i bolje osobine u pogledu formabilnosti usled izotropnosti odgovarajućih mehaničkih veličina [54–56].

Granica plastičnosti određenog materijala se povišava onemogućavanjem kretanja dislokacija unutar zrna i u tom smislu čvrsti rastvori, odnosno legure imaju široku primenu u tehnologiji elektronskih komponenata. Naime, bez obzira da li se legure formiraju supstituciono ili intersticijalno, atomi legirajuće komponente predstavljaju prepreke kretanju dislokacija i time povećavaju granicu plastičnosti osnovnog materijala. Osim toga, radi povećanja ove granice, primenjuju se određeni postupci očvršćavanja materijala upotrebom mehaničkih tehnika i/ili primenom temperaturnih tretmana.

Očvršćavanje naprezanjem predstavlja trajno deformisanje materijala sa ciljem povećanja

nja njegove granice plastičnosti i ostvaruje se putem takozvane hladne obrade materijala. Obično je to postupak valjanja materijala u obliku traka čime se postiže izduživanje zrna unutar strukture i povećanje ukupne granice zrna, a sa tim i onemogućavanje kretanja i stvaranja novih dislokacija. Sam postupak hladne obrade materijala smanjuje njegovu formabilnost, tako da se koristi u kombinaciji sa termičkom rekristalizacijom strukture na odgovarajućim visokim temperaturama [57].

Termičkim tretmanom moguće je povećati čvrstoću konačnog proizvoda. Naime, metali koji se posle fabrikovanja mogu termički očvršćavati pokazuju najbolju kombinaciju granice plastičnosti i mogućnosti oblikovanja. Sam postupak očvršćavanja se često naziva i termičko starenje pri čemu metal pokazuje dobru do odličnu formabilnost pre, a dobru do odličnu čvrstoću posle starenja. *Termičko očvršćavanje* uključuje više različitih mehanizama poput zagrevanja rastvora, disperzionog očvršćavanja, kaljenja, starenja taloga i spinodalnog razlaganja [58].

Postupcima očvršćavanja materijala u suštini se menja izgled krive naprezanje – deformacija time što se povišava granica plastičnosti. Obzirom da realna zavisnost naprezanje – deformacija u oblasti plastičnog naprezanja prati stepeni zakon oblika $S = K\epsilon^n$, eksponentom očvršćavanja n i koeficijentom čvrstoće K se opisuje ponašanje materijala prilikom njegovog oblikovanja. Više vrednosti eksponenta očvršćavanja daju bolju mogućnost oblikovanja, dok više vrednosti koeficijenta čvrstoće ukazuju na veće primenjeno očvršćavanje materijala. Vrednosti ovih koeficijenata, kao i koeficijenta anizotropnosti su značajne za uspostavljanje proizvodnog procesa izrade kontakata. Postupci savijanja i istežanja materijala zahtevaju visoke eksponente očvršćavanja, dok proces izvlačenja zahteva visok koeficijent anizotropnosti [59], [60]. Međutim, treba imati u vidu da broj tehnoloških koraka u procesiranju materijala ima uticaja na vrednost zaostale napregnutosti u njemu [61].

Za dobijanje informacija o relativnoj čvrstoći materijala, kao i za procenu mehaničkih osobina određenog komada metala ili izrađenog dela često se koriste testovi tvrdoće poput *Brinell*–ovog, *Rockwell*–ovog, *Vickers*–ovog i *Knoop*–ovog [62], [63].

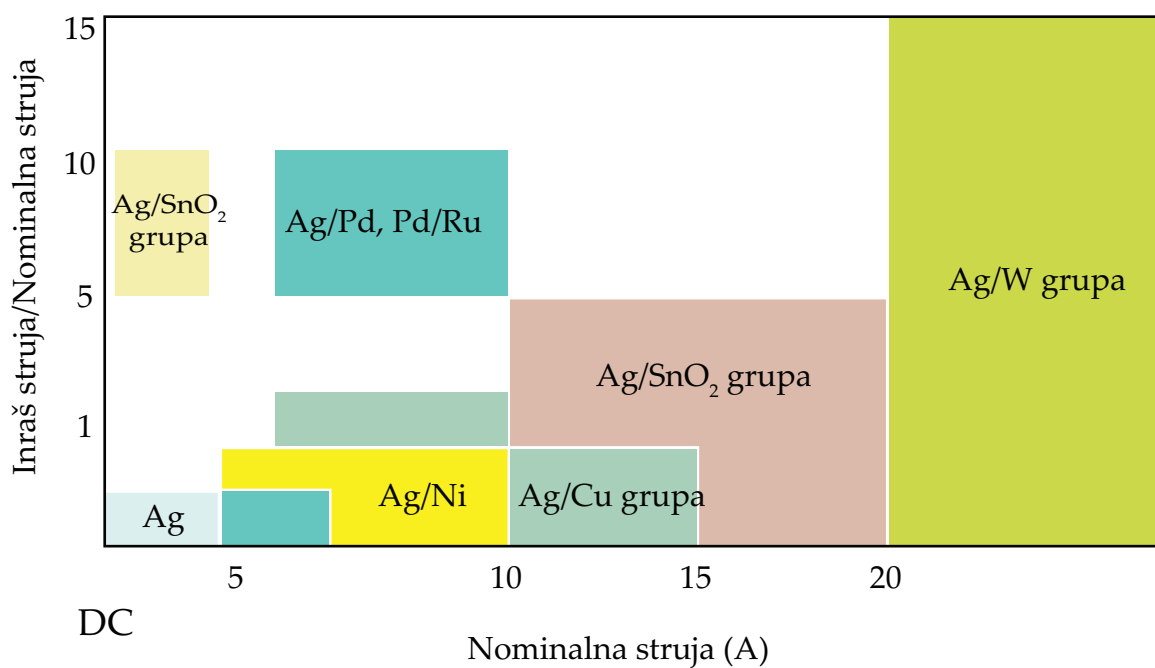
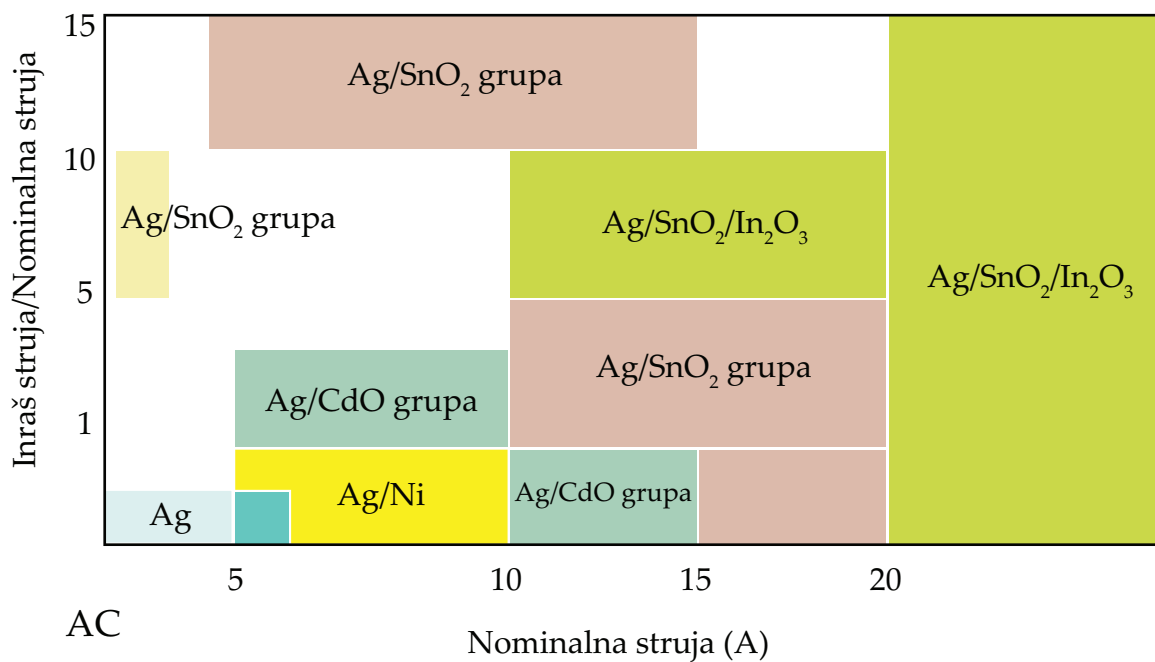
1.3.2 Električni aspekt izbora kontaktnih materijala

Vrednosti električnih veličina (nominalni napon, nominalna struja, inraš struja) koje kontakt treba uspešno da prenese predstavljaju polazne parametre pri projektovanju kontakata, a samim tim i pri izboru kontaktnih materijala. Visoke vrednosti nominalne i inraš struje su uzročnici različitih efekata degradacije kontakata koji su navedeni u potpoglavlju 1.1.1. Otpornost određenog materijala na ove efekte predstavlja opredeljujući faktor pri njegovom izboru za realizaciju kontakata koji se ugrađuju u releje i prekidače za prenos visokih snaga. Okvirni izbor kontaktnih materijala na bazi srebra imajući u vidu vrednosti nominalne i inraš struje, a za primenu u uređajima kućne namene (naizmjenična struja) i automobilske industriji (jednosmerna struja) je dat na slici 1.7.

1.3.3 Pregled najčešće korišćenih kontaktnih materijala

Imajući u vidu osobine materijala koje su značajne za funkcionisanje električnih kontakata u tabeli 1.1 su date prednosti i nedostaci najčešće korišćenih kontaktnih materijala [27, 29, 58, 64–73].

Iz date tabele se vidi da je broj osobina materijala koje imaju uticaja na performanse kontakata značajan, a da postoji i široka paleta materijala koji mogu da zadovolje odre-



Slika 1.7: Klasifikacija kontaktnih materijala na bazi srebra u zavisnosti od nominalne i inraš struje [64].

| Osobina | Material |
|--|---|
| Električna i termička provodnost | Ag |
| Vrednost otpornosti kontaktiranja | Ag |
| Stabilnost otpornosti kontaktiranja | Ag |
| Otpornost na električno habanje | Ag |
| Otpornost na prenos materijala | Ag |
| Otpornost na lučno pražnjenje | Ag |
| Otpornost na zavarivanje | Ag |
| Čvrstoća | Ag |
| Tvrdoća | Ag |
| Mehanička obradivost | Ag |
| Mogućnost lemljenja | Ag |
| Otpornost na mehaničko habanje | Ag |
| Otpornost na koroziju oksidacijom | Ag |
| Otpornost na koroziju razjedanja | Ag |
| Hemijska reaktivnost | Ag |
| Otpornost na termičke i mehaničke šokove | Ag |
| Vrednost sile kontaktiranja | Ag |
| Vrednost zaostale napregnutosti | Ag |
| Pouzdanost | Ag |
| Ekološka podobnost | Ag |
| Cena | Ag |
| | Ag/Ni |
| | Ag/Cu |
| | Ag/Cu/Ni |
| | Ag/CdO |
| | Ag/SnO ₂ |
| | Ag/SnO ₂ /In ₂ O ₃ |
| | Ag/Pd |
| | Ag/ZnO |
| | Ag/C |
| | Ag/W |
| | Ag/Mo |
| | Au |
| | Au/Ni |
| | Au/Ag |
| | Au/Ag/Pt |
| | Sn |
| | Ni |
| | Pt |
| | Pt/Ir |
| | Pd |
| | Pd/Ru |
| | W |
| | Cu/Cr |
| | Cu/W |
| | Cu/Be |

Legenda:



Loše



Dobro



Odlično

Tabela 1.1: Prednosti i nedostaci najčešće korišćenih kontaktnih materijala.

đene zahteve. U osnovi, specifičnost primene određenog tipa kontakata određuje izbor kontaktnog materijala i načina formiranja prevlake. Pravi izbor materijala prevlake (pored cene) zavisi od temperature i hemijske agresivnosti sredine u kojoj kontakt funkcioniše, vrednosti nominalne i inraš struje, kao i broja ciklusa kontaktiranja koje kontakt treba pouzdano da ostvari. Dalje u postupku projektovanja kontakata izbor kontaktnog materijala nameće vrednosti sile kontaktiranja koje obezbeđuju ispravan rad kontakata.

U sklopu globalnih tendencija smanjenja dimenzija električnih uređaja sa smanjenjem dimenzija kontakata njihova sposobnost prenosa električne struje se takođe smanjuje. Usled smanjenih površina sa kojih se putem konvekcije odaje toplota dolazi i do povišenja temperature kontakata, što sa druge strane uzrokuje porast otpornosti tela kontakata. Ovo nameće potrebu da se pri projektovanju koriste materijali više električne provodnosti, uprkos njihovoj visokoj ceni, kako bi se izbegao porast otpornosti i temperature [74]. Osim toga, male dimenzije kontakata zahtevaju i materijale koji imaju veću mogućnost oblikovanja kako bi se u postupku izrade postigli mali radijusi zaobljenih površina bez preloma [75]. Shodno činjenici da visoka granica plastičnosti i mogućnost oblikovanja određenog materijala najčešće nisu kompatibilne, nalaženje kompromisa između ovih parametara je neophodno. Usled toga izbor optimalnog materijala za izradu kontakata malih dimenzija treba da predstavlja najbolju kombinaciju između čvrstoće, električne i termičke provodnosti, zamora materijala, otpornosti na smanjenje napregnutosti i mogućnosti oblikovanja [28].

1.4 Određivanje geometrije i dimenzija električnih kontakata

S obzirom na raznovrsnost prekidačkih komponenata u okviru kojih funkcionišu, električni kontakti se javljaju u više oblika i veoma su različitih dimenzija. Najčešći oblici kontakata su: zakovičasti, krstasti, pravougaoni, u obliku diska ili dugmadi. Po načinu izrade mogu biti masivni i višeslojni [68,70]. Masivni kontakti se u celini izrađuju od visokoprovodnih materijala (najčešće plemenitih metala i njihovih legura). Višeslojni kontakti se u cilju smanjenja cene proizvode uglavnom od bakra, s tim što se kod bimetalnih jedna, a kod trimetalnih obe kontaktne površine prevlače tankim slojem izabranog kontaktnog materijala.

Postupak projektovanja električnih kontakata po pitanju geometrije i dimenzija zahteva određivanje osnovnog oblika kontakta, načina izrade, preciziranje dimenzija i njihovih tolerancija. Oblik kontakta je definisan mestom i postupkom ugradnje u prekidački uređaj, dok način izrade prevashodno zavisi od cene i raspoloživih tehnika izrade. Specificiranje dimenzija kontakata zahteva izbor tipa u okviru osnovnog oblika kontakta, a zatim definisanje preciznih brojnih vrednosti. Izbor tipa kontakta je takođe uslovljen mestom ugradnje i načinom kontaktiranja, dok su dimenzije i tolerancije određene vrednostima nominalne struje i tehnološkim ograničenjima [76].

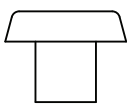
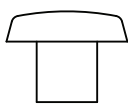
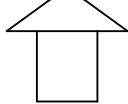
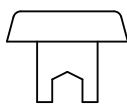
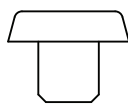
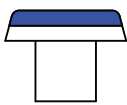
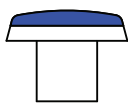
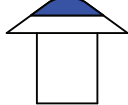
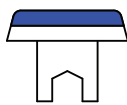
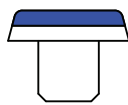
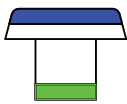
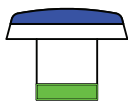
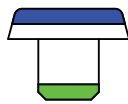
Jedan od najčešće korišćenih oblika kontakata je zakovičasti. Ovakvi kontakti imaju primenu u kućnim prekidačima, uređajima široke potrošnje i bele tehnike. U novije vreme zakovičasti kontakti se masovno primenjuju i u automobilskoj industriji u snažnim relejima. Prednosti ovakvog oblika kontakata se ogledaju kroz [64,70]:

- jednostavan automatizovan postupak ugradnje zakivanjem,

- ostvarenje čvrste i stabilne veze sa nosećom strukturom pri nižim i srednjim vrednostima opterećenja,
- zadržavanje elastičnih osobina noseće strukture usled nepostojanja direktnog zagrevanja pri lučnom pražnjenju,
- izostanak procesa oksidacije i kontaminacije na mestima spajanja.

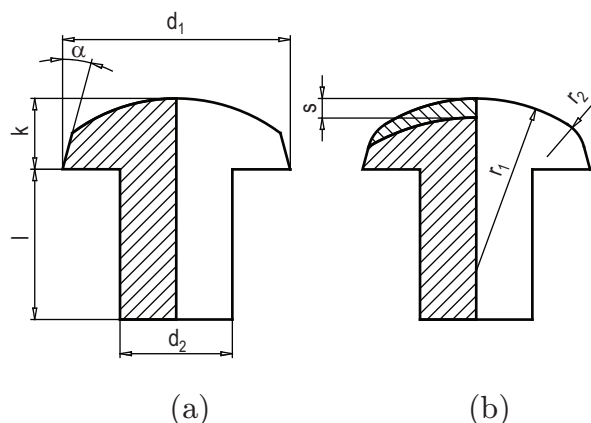
Po načinu izrade kontakti zakovičastog oblika mogu biti masivni, bimetalni i trimetalni. Masivni zakovičasti kontakti se standardno izrađuju postupkom plastične deformacije osnovnog materijala u obliku žice, čime se formira kontaktna glava u posebno oblikovanim kalupima. Usled ograničenja koja po pitanju dimenzija postavlja postupak plastičnog deformisanja, u novije vreme za izradu zakovičastih kontakata se koristi i tehnika istiskivanja. Kod višeslojnih kontakata dodatno prevlačenje osnovnog materijala (bakra) ostvaruje se procesom zavarivanja ili mehaničkog prilepljivanja materijala prevlake u obliku trake.

U geometriji zakovičastih kontakata jasno se izdvajaju glava i stablo. Na osnovu oblika glave podela kontakata je na one sa ravnom, zaobljenom ili koničnom glavom, dok po obliku stabla mogu biti ravnog, tubularnog ili zarubljenog tipa. Klasifikacija zakovičastih kontakata po načinu izrade i geometriji je data na slici 1.8. Standardni oblici su masivni i bimetalni sa ravnom ili zaobljenom glavom i ravnim stablom. Obično se ravna glava koristi kod nepokretnih, a zaobljena kod pokretnih kontakata. Konična glava kontakta ima primenu u slučajevima kada je od značaja vrednost otpornosti kontaktiranja, i ovakvim oblikom se izbegava korozija i loše kontaktiranje u prisustvu prašine. Tubularni oblik stabla omogućava spajanje sa krtim nosećim strukturama poput bakelita i tvrde plastike, dok se zarubljenim oblikom obezbeđuje jednostavno i brzo automatsko zakivanje kontakta. Trimetalnom izradom smanjuje se cena kontakata kod kojih se zahteva kontaktiranje sa obe strane poput pokretnih kontakata. Specijalna realizacija trimetalnih kontakata je kod primene u uređajima koji rade na povišenim temperaturama gde se i stablo i donja strana glave kontakta prevlače odgovarajućom legurom, čime se istovremeno obezbeđuje i mehanička i veza putem lemnog spoja [68].

| | Sa ravnom glavom | Sa zaobljenom glavom | Sa koničnom glavom | Tubularni | Sa zarubljenim stablom |
|------------|---|---|---|--|---|
| Masivni |  |  |  |  |  |
| Bimetalni |  |  |  |  |  |
| Trimetalni |  |  | | |  |

Slika 1.8: Klasifikacija zakovičastih kontakata po načinu izrade i geometriji.

Dimenzije izabranog tipa kontakta su određene vrednošću nominalne struje i geometrijom noseće strukture, pri čemu postoje tehnološka ograničenja vezana za odnos određenih dimenzija. Na slici 1.9 je prikazan poprečni presek zakovičastih kontakata masivnog i bimetalnog tipa sa zaobljenom glavom i ravnim stablom, dok su oznake odgovarajućih dimenzija navedene u tabeli 1.2.



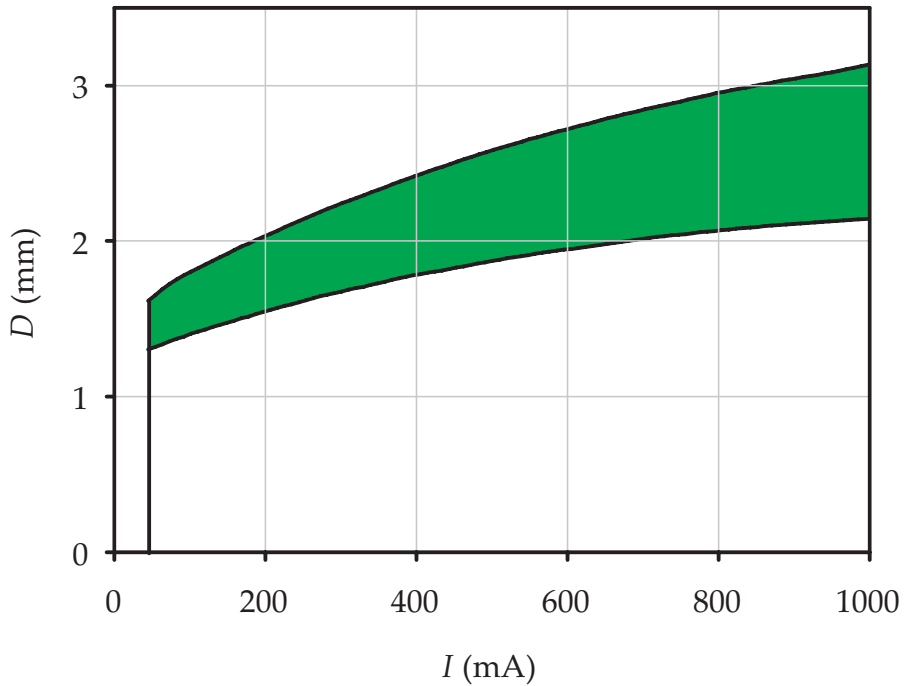
Slika 1.9: Poprečni presek masivnog (a) i bimetalnog (b) kontakta zakovičastog oblika.

| Dimenzija | Oznaka |
|-------------------------------|---------------|
| Prečnik glave | d_1 |
| Prečnik stabla | d_2 |
| Ukupna visina glave | k |
| Visina kontaktnog sloja | s |
| Dužina stabla | l |
| Poluprečnici zaobljenja glave | r_1 i r_2 |
| Ugao nagiba glave | α |

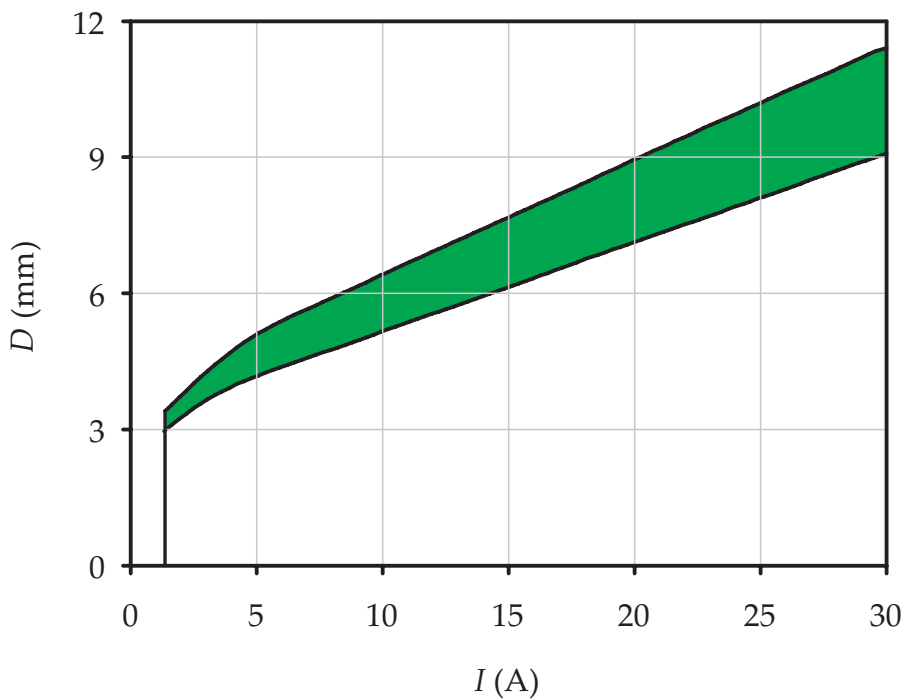
Tabela 1.2: Oznake dimenzija zakovičastih kontakata.

Usvajanje dimenzija kontakata pri projektovanju se bazira na početnom određivanju prečnika glave kontakta na osnovu nominalne vrednosti struje. Izbor ove dimenzije, usled tehnoloških ograničenja, treba da predstavlja umnožak 0,5 mm i uključuje odgovarajuće standarde. Opšte prihvaćena pravila propisuju upotrebu masivnih kontakata za prečnike glava manjih od 2,5 mm, dok za prečnike iznad 6,5 mm preporučena je upotreba višeslojnih kontakata. Vrednost tolerancije ove dimenzije je $\pm 0,1$ mm. Za primene pri niskim nivoima nominalne struje za kontakte izrađene od srebra i njegovih legura (masivni kontakti) može se koristiti zavisnost data na slici 1.10. Za nominalne struje visokih vrednosti primenljivi prečnik glave kontakta je prikazan na slici 1.11 (višeslojni kontakti).

Prečnik stabla kontakta takođe treba da predstavlja umnožak 0,5 mm kod višeslojnih kontakata, dok su kod masivnih kontakata (obično za prečnike glave manje od 2 mm) uobičajene vrednosti 0,8 mm, 1 mm i 1,2 mm. Ovaj prečnik mora biti u odgovarajućoj korelaciji sa prečnikom glave kontakta kako bi se omogućila njegova efikasna proizvodnja i obezbedila funkcionalnost. U osnovi traženi odnos bi trebalo da bude $d_1/d_2 = 1,7 - 2,3$. Ovakvim odnosom se obezbeđuje dobro prileganje glave kontakta za noseću strukturu i eliminiše pojava parazitne prelazne otpornosti [78]. U novije vreme



Slika 1.10: Primenljivi prečnik kontaktne glave pri niskim vrednostima nominalne struje [77].



Slika 1.11: Primenljivi prečnik kontaktne glave pri visokim vrednostima nominalne struje [77].

je omogućena izrada zakovičastih kontakata čiji odnos d_1/d_2 izlazi iz navedenih opsega primenom tehnike istiskivanja. Na taj način je moguće dobiti kontakte specijalnih oblika uz zadržavanje zadatog kvaliteta [70]. Dozvoljena vrednost odstupanja ove dimenzije je $+0,0/-0,1$ mm čime se izbegava nemogućnost umetanja kontakta u odgovarajući otvor u nosećoj strukturi.

Dobro dizajnirani kontakti imaju ukupnu visinu glave minimalno 0,5 mm kod masivnih i 0,7 mm kod višeslojnih kontakata. Preporučuje se relacija $k/d_1 = 0,2 - 0,4$. Veća visina glave omogućava bolje oslobađanje disipirane toplote i smanjen porast radne temperature. Međutim, treba imati u vidu da suviše male i suviše velike vrednosti mogu da unose poteškoće u tehnološki niz izrade kontakata. Donja granica tolerancije ove vrenosti se postavlja na $-0,0$ mm s obzirom da se procesom zakivanja u noseću strukturu ukupna visina glave kontakta smanjuje. Gornja granica tolerancije je u opštem slučaju $+0,05$ mm, s tim da se za prečnike glava veće od 6 mm ova vrednost može podići na $+0,1$ mm.

Kontaktni sloj prevlake je najdeblji na sredini kontaktne glave, dok se ka njenom obodu smanjuje (osim kod ravne glave). Pri zakivanju kontakata u noseću strukturu dolazi do delimičnog izravnjavanja debljeg dela prevlake. Debljina prevlake na centralnom delu obično iznosi 25% – 65% ukupne visine glave i zavisi od izabranog kontaktnog materijala. Optimalna vrednost je 50%, a njene tolerancije su $\pm 0,05$ mm.

Dužina stabla kontakta je obično za 0,8 – 1,5 mm veća od debljine noseće strukture i u procesu proizvodnje je lako promenljiva veličina. Da bi se obezbedilo efikasno i pouzdano zakivanje kontakta u noseću strukturu dozvoljeno odstupanje ove veličine je $-0,0/+0,15$ mm.

Poluprečnik zaobljenja glave kontakta r_1 se kreće od $1,2 \cdot d_1$ kod masivnih do $4 \cdot d_1$ kod višeslojnih kontakata. Njegova tolerancija je ± 2 mm.

Ugao nagiba glave kontakta je standardno 9° ili 15° sa dozvoljenim odstupanjem $\pm 2^\circ$.

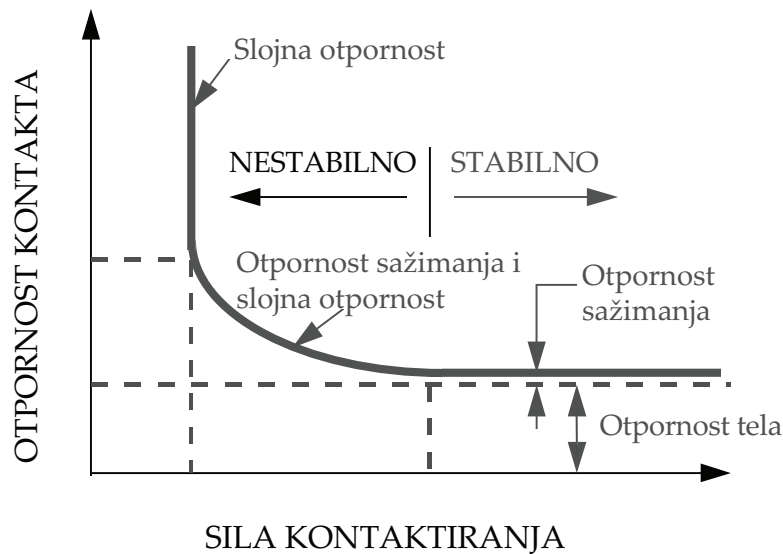
Proces izrade projektovanih kontakata zavisi od njihove geometrije i mehaničkih osobina iskorišćenog materijala. Pri tome, razvoj tehnologije izrade zahteva određivanje pogodnog oblika poprečnog preseka komada osnovnog materijala (traka ili žica) [79], kao i poznavanje zavisnosti osobina materijala od orijentacije (longitudinalna ili transferzalna) [80].

1.5 Određivanje minimalne sile kontaktiranja

Postupak projektovanja električnih kontakata nakon izbora kontaktnog materijala, geometrije i dimenzija kontakta obuhvata određivanje minimalne sile, odnosno minimalnog pritiska kontaktiranja. Vrednost sile kontaktiranja treba da obezbedi ostvarenje dobrog kontakta između dve kontaktne međupovršine, što manje odskakivanje kontakata pri zatvaranju i njihov pouzdan rad u toku projektovanog radnog veka. Određivanje ove vrednosti je uslovljeno vrednošću nominalne struje, geometrijom kontakta, osobinama kontaktnog materijala i zahtevanim brojem ciklusa kontaktiranja. Obzirom da se kontakti ugrađuju u odgovarajuće noseće strukture sila kontaktiranja je određena i njenim osobinama [12].

Ukupna otpornost kontakta, kao što je napred navedeno, sastoji se od otpornosti tela kontakta i otpornosti kontaktiranja. *Otpornost tela kontakta* zavisi od električne otpornosti kontaktnog materijala i oblika kontakta. Otpornost kontaktiranja se sastoji od *otpornosti sažimanja* i *slojne otpornosti* i zavisi od sile kontaktiranja između dve površine. Površine

koje se kontaktiraju nisu idealno glatke (sadrže niz izbočina), tako da se stvarni prenos električnih veličina vrši na mestima gde se ove izbočine dodiruju. Usled toga što se električne strujnice skupljaju kako bi prošle kroz međupovršinu kontakta nastaje otpornost sažimanja. Slojna otpornost je posledica postojanja tankih slojeva oksida i prljavštine koji se formiraju na površinama kontakata. Sa povećanjem vrednosti sile kontaktiranja, povećavaju se površine kroz koje signal može da pređe između međupovršina kontakata, tako da se istovremeno smanjuju i otpornost sažimanja i slojna otpornost. Pri dovoljno visokim vrednostima sile kontaktiranja ukupna otpornost kontakta se svodi na otpornost tela kontakta. Takođe, sa smanjenjem sile kontaktiranja slojna otpornost postaje preovlađujuća komponenta u ukupnoj otpornosti kontakta. Ova zavisnost otpornosti kontakata od sile kontaktiranja je prikazana na slici 1.12.



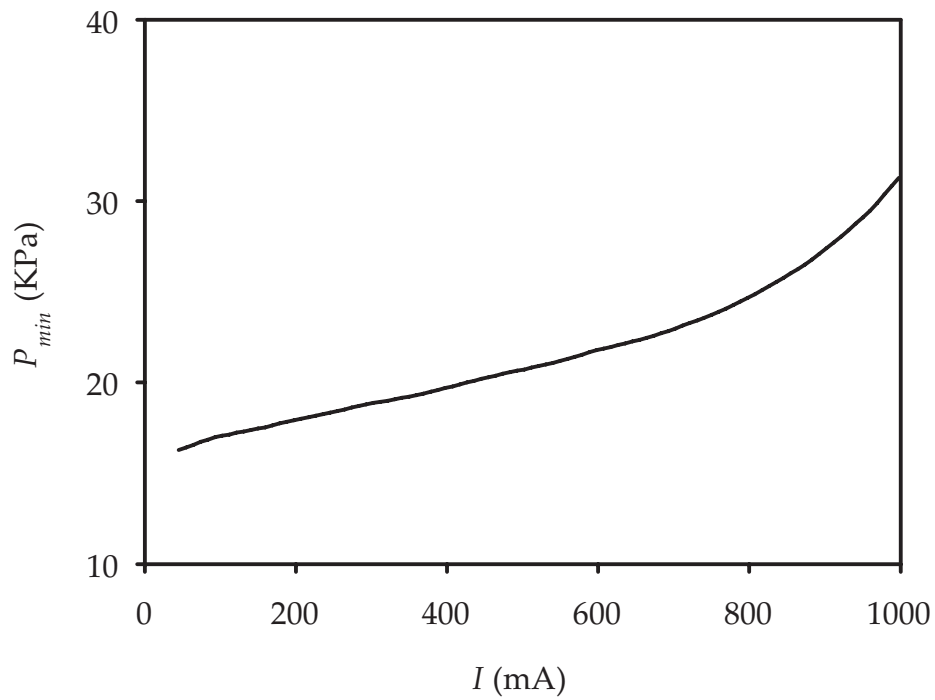
Slika 1.12: Zavisnost ukupne otpornosti kontakta od vrednosti sile kontaktiranja [81].

Često se umesto minimalne zahtevane sile kontaktiranja zadaje vrednost minimalnog pritiska kontaktiranja koji se ostvaruje na kontaktnim površinama. Sila i pritisak kontaktiranja su povezani preko veličine kontaktne površine. Uobičajena zavisnost minimalnog kontaktnog pritiska za niske nominalne struje za kontakte izrađene od srebra i njegovih legura (masivni kontakti) je prikazana na slici 1.13. Za visoke vrednosti nominalne struje ova zavisnost je prikazana na slici 1.14.

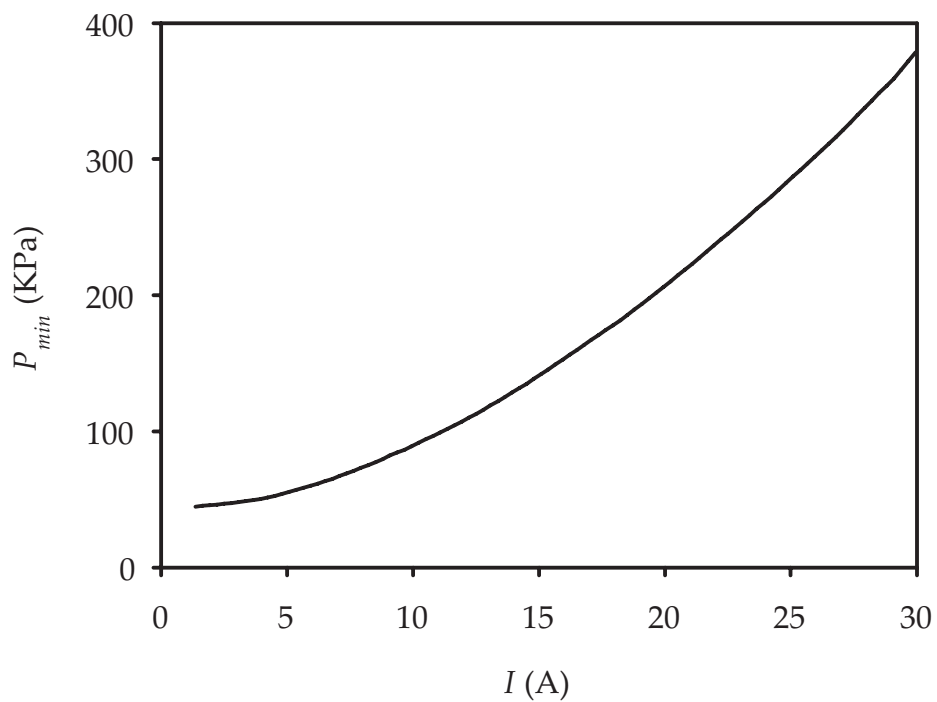
Minimalna vrednost pritiska kontaktiranja određena na osnovu zavisnosti sa slika 1.13 i 1.14 u kombinaciji sa izabranim prečnikom kontaktne glave na osnovu slika 1.10 i 1.11 omogućava određivanje minimalne sile kontaktiranja neophodne za ostvarivanje dobrog kontakta. U praksi se za brzo određivanje minimalne sile kontaktiranja F_{min} u zavisnosti od nominalne struje I_{nom} koristi aproksimacija $F_{min} = p \cdot I_{nom}$, gde koeficijent proporcionalnosti p ima vrednost 0,15 N/A za $I_{nom} \leq 1$ A; 0,2 N/A za 1 A $< I_{nom} \leq 5$ A; 0,36 N/A za 5 A $< I_{nom} \leq 50$ A [78].

Mehaničke osobine materijala koje utiču na vrednost sile kontaktiranja su prvenstveno vrednost modula elastičnosti, granica plastičnosti i smanjenje napregnutosti tokom vremena [82]. Bolje karakteristike u ovom pogledu obezbeđuju niže vrednosti otpornosti sažimanja, dok se smanjenje slojne otpornosti ostvaruje upotrebom hemijski nereaktivnih materijala kojima se otklanja efekat korozije.

Tokom predviđenog životnog veka kontakti treba da zadrže odgovarajuću vrednost sile kontaktiranja. S obzirom da osobine kontakata degradiraju tokom vremena, pri njihovom projektovanju moraju se uzeti u obzir podaci o očekivanom vremenu pouzdanog



Slika 1.13: Minimalni kontaktni pritisak pri niskim vrednostima nominalne struje [77].



Slika 1.14: Minimalni kontaktni pritisak pri visokim vrednostima nominalne struje [77].

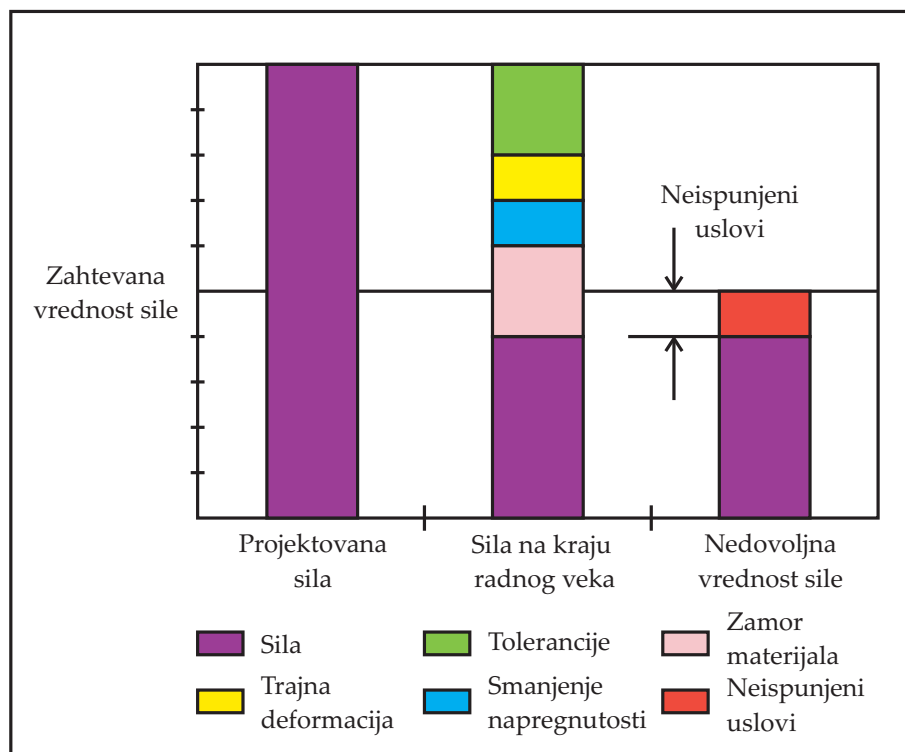
rada, kao i neophodnom broju kontaktiranja bez otkaza. Smanjenje sile kontaktiranja tokom vremena nastaje ukoliko je došlo do trajnog deformisanja kontakata u toku nje-gove izrade, ukoliko postoji smanjenje napregnutosti tokom vremena i usled zamora materijala.

U procesu izrade električnih kontakata primenjuju se različite operacije poput pre-sovanja, valjanja, isecanja, istiskivanja, zaobljavanja, i one u finalni proizvod unose takozvanu zaostalu napregnutost [61]. U kombinaciji sa projektovanim naprezanjem koje postoji tokom rada kontakata, zaostala napregnutost može da dovede do neoče-kivanih vrednosti stvarne napregnutosti, do njenog smanjenja tokom vremena, trajne deformacije kontakata i postupnog gubitka sile kontaktiranja. Smanjenje napregnutosti tokom vremena u kontaktima zavisi od temperature, početne vrednosti napregnutosti i materijala. U cilju eliminisanja zaostale napregnutosti u kontaktima koriste se materijali koji su podvrgnuti očvršćavanju termičkim tretmanom ili procesom starenja [83].

Vrednost sile kontaktiranja pri kraju radnog veka zavisi i od zamora materijala. S obzirom da sila kontaktiranja prouzrokuje naprezanje u kontaktnom materijalu, shodno razmatranju datom u 1.1.1, ukoliko kontakti treba da izdrže veći broj ciklusa kontakti-ranja vrednost napregnutosti u njima se mora smanjiti.

Dodatno, proračun sile kontaktiranja obično pretpostavlja da sve dimenzije kontakata padaju po sredini dozvoljenog opsega vrednosti. U praksi postoji odstupanje realnih vrednosti u okviru određenih tolerancija tako da sila kontaktiranja varira u odnosu na projektovanu vrednost.

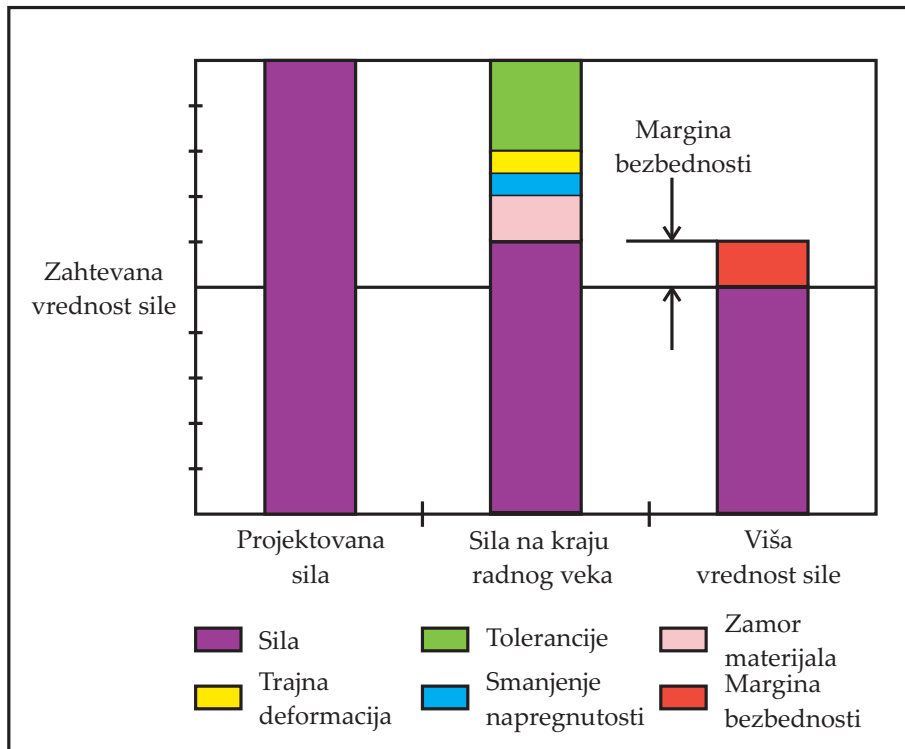
Na slici 1.15 je prikazan neodgovarajući izbor materijala za kontakte sa zadatim vrednostima projektovane i na kraju radnog veka sile kontaktiranja i tolerancija dimen-zija [84].



Slika 1.15: Loš izbor kontaktnog materijala sa aspekta sile kontaktiranja [84].

Materijali sa višom granicom plastičnosti omogućavaju postizanje viših vrednosti sile

kontaktiranja, dok materijali sa manjim smanjenjem napregnutosti tokom vremena obezbeđuju zadržavanje projektovane sile kontaktiranja tokom vremena. Dodatno, materijali sa manjim zamorom daju višu silu kontaktiranja za određeni broj ciklusa kontaktiranja ili traju duže pri konstantnoj vrednosti sile. Izborom adekvatnog materijala obezbeđuje se da sila kontaktiranja i na kraju radnog veka ima vrednost iznad zahtevane. Slika 1.16 prikazuje kontakt sa slike 1.15 kada se pri projektovanju izabere materijal odgovarajućih karakteristika.



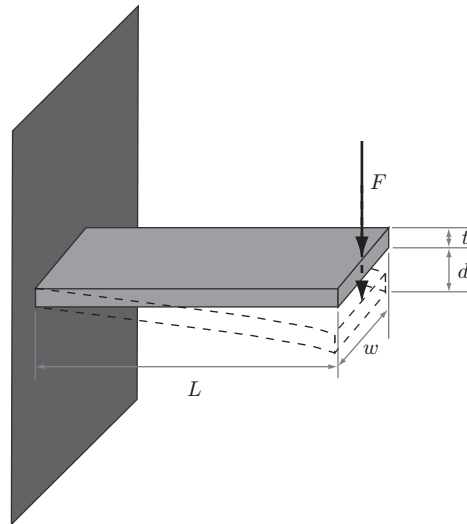
Slika 1.16: Dobar izbor kontaktnog materijala sa aspekta sile kontaktiranja [84].

Električni kontakti se pri ugradnji vezuju za odgovarajuću noseću strukturu. Pri tome osobine noseće strukture određuju postizanje dobrog kontakta u električnom smislu, ali i značajno utiču na postojanje klizanja i odskakivanja kontakata prilikom zatvaranja, a time i na određivanje minimalne sile kontaktiranja. U mnogim slučajevima noseća struktura ima oblik tanke pločice koja je fiksirana na jednom kraju, a na drugom kraju izložena dejstvu sile kontaktiranja. Takođe, u prekidačkim sklopovima se često kao jedna od kontaktnih površina koristi deo površine takve pločice. Materijal od koga je pločica izrađena, njene dimenzije, kao i način fiksiranja u okviru prekidačkog sklopa određuju funkcionisanje kontakata, kako u mehaničkom, tako i u električnom i termičkom domenu. Horizontalna pločica sa naznačenim dimenzijama i ostvarenim deformisanjem pri dejstvu odgovarajuće sile kontaktiranja je prikazana na slici 1.17.

Maksimalna vrednost napregnutosti u pločici pod dejstvom sile kontaktiranja je na njenoj donjoj i gornjoj površini na fiksiranom kraju. Ukoliko deformacija ne prelazi granicu proporcionalnosti maksimalna vrednost napregnutosti zavisi od modula elastičnosti E_m i data je izrazom [82]:

$$S_{max} = \frac{3E_m t}{2L^2} \cdot d, \quad (1.2)$$

gde je t debljina pločice, L dužina pločice i d vrednost savijanja pločice.



Slika 1.17: Elastična pločica pod dejstvom sile kontaktiranja [82].

Pri projektovanju kontakata potrebno je obezbediti dovoljnu vrednost sile kontaktiranja F za datu vrednost savijanja pokretnog dela pločice. Ova sila je data izrazom:

$$F = \frac{E_m w t^3}{4L^3} \cdot d, \quad (1.3)$$

gde je w širina pločice.

S obzirom da tokom eksploatacije pločica ne sme da se trajno deformiše, iz izraza (1.2) za vrednost maksimalnog naprezanja koja odgovara granici plastičnosti materijala S_{plast} određuje se dozvoljeno savijanje d_{plast} :

$$d_{plast} = \frac{2L^2}{3E_m t} \cdot S_{plast}. \quad (1.4)$$

Ovoj vrednosti savijanja odgovara sila kontaktiranja na granici plastičnosti F_{plast} :

$$F_{plast} = \frac{w t^2}{6L} \cdot S_{plast}. \quad (1.5)$$

Zahtevi projektovanja kontaktne pločice nameću potrebu dobijanja što viših vrednosti dozvoljenog savijanja pločice i sila kontaktiranja na granici plastičnosti. Na osnovu izraza (1.4) i (1.5) dolazi se do zaključka da povećanje dužine, širine i debljine pločice može poboljšati njene karakteristike. Sa druge strane, savremeni trendovi u projektovanju električnih i elektronskih uređaja teže ka minijaturizaciji. Vrednost sile kontaktiranja je direktno proporcionalna napregnutosti tako da se sa smanjenjem dimenzija kontakata projektovana vrednost napregnutosti mora povećati kako bi se održala željena vrednost sile kontaktiranja. Time se nameće potreba upotrebe materijala koji svojim mehaničkim osobinama prevazilaze ova geometrijska ograničenja. Najbolje rešenje predstavljaju materijali koji imaju veliki odnos granice plastičnosti i modula elastičnosti, odnosno visoku elastičnu otpornost. U praksi se kao indikator mogućnosti upotrebe razmatranog materijala kod elastičnih pločica obično koristi moduo elastične otpornosti koji predstavlja gustinu energije deformacije neophodnu da dovede materijal do granice plastičnosti. Vrednost ovog modula zavisi od oblika krive naprezanje – deformacija izabranog materijala i njegova viša vrednost obezbeđuje bolju silu kontaktiranja [85].

Glava 2

3–D simulacija električnih kontakata u električnom, termičkom i mehaničkom domenu

Predviđanje karakteristika električnih kontakata pri zadatim radnim uslovima predstavlja složen zadatak iz razloga što uvek nedostaju precizne informacije o parametrima funkcionalnosti i pouzdanosti kontakata. Izloženi visokim strujama, mnogobrojnim i čestim ciklusima uključivanja i isključivanja, kao i hemijski agresivnim sredinama kontakti vremenom gube deo funkcionalnosti, a često i otkazuju usled različitih degradacionih efekata opisanih u poglavlju 1.1. Za rešavanje nekih od navedenih problema simulacija karakteristika kontakata u 3–D domenu se koristi kao moćno CAD–CAE (Computer Aided Design – Computer Aided Engineering) sredstvo.

Stoga rezultati simulacije karakteristika kontakata u električnom, termičkom i mehaničkom domenu, uz razmatranje svih dostupnih podataka o uslovima njihove eksploatacije, daju podatke neophodne za uspešno projektovanje i optimizaciju kontakata. Pri tome je omogućeno ispitivanje uticaja izabranog kontaktnog materijala i pojedinih geometrijskih i konstrukcionih činilaca, kako kontakata tako i prekidačkog sklopa na pouzdan rad kontakata.

2.1 Opis razmatranih struktura

Projektovanje električnih kontakata za primenu u kućnim prekidačima, uređajima široke potrošnje i bele tehnike (kod kojih vrednosti struje ne prelaze 15 A) na osnovu postavki datih u glavi 1 zahteva izbor specifičnog tipa, geometrije i dimenzija kontakta, kontaktnog materijala i minimalne sile, odnosno pritiska kontaktiranja. Shodno razmatranjima navedenim u poglavlju 1.4, izabrani su masivni kontakti zakovičastog oblika sa zaobljenom glavom. Ovakav oblik kontakta je pogodan prvenstveno zbog jednostavnog spajanja sa nosećom strukturom (zakivanjem) čime se ostvaruje dobar kontakt između elemenata. Istovremeno se izbegava direktno zagrevanje noseće stukture pri visokotemperaturnim procesima uključivanja struje, a time i degradacija njenih elastičnih osobina, dok se zaobljenim oblikom glave kontakta minimizuje njegovo odskakivanje pri uključivanju. Kao materijal od koga su kontakti izrađeni, na osnovu osobina opisanih u poglavlju 1.3 i zahteva domaćeg tržišta, uzeto je srebro čistoće 99,99%. Za silu kontaktiranja je usvojena vrednost od 0,15 N/A za struje do 1 A i 0,2 N/A za više vrednosti struja (zadovoljava zavisnosti date na slikama 1.13 i 1.14).

Analogna razmatranja važe i za izbor električnih kontakata za primenu u snažnijim prekidačkim sklopovima pri strujama do 40 A. Takođe su usvojeni zakovičasti kontakti sa zaobljenom glavom, ali bimetalne izrade. Kao osnovni materijal je uzet bakar, a za materijal prevlake legure: 90%Ag–10%Ni, 97%Ag–3%Cu (tvrdo srebro) i 90%Ag–10%CdO. Sila kontaktiranja u ovom slučaju ima vrednost 0,36 N/A.

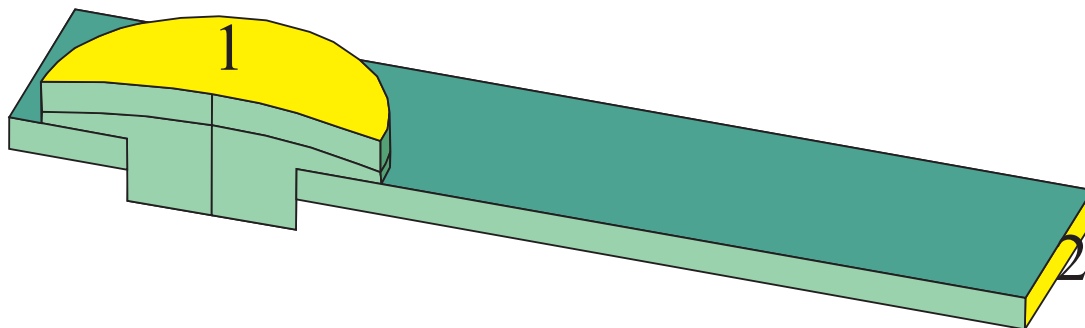
Vrednosti dimenzija projektovanih kontakata naznačenih na slici 1.9 određene su na osnovu postavki datih u poglavlju 1.4 i specificirane u tabeli 2.1.

| Dimenzija | Vrednost (mm) | |
|---|---------------|-----------|
| | masivni | bimetalni |
| Prečnik glave – d_1 | 3 | 5; 5,5; 6 |
| Prečnik stabla – d_2 | 1,5 | 2,5 |
| Ukupna visina glave – k | 0,7 | 1 |
| Visina kontaktnog sloja – s | - | 0,5 |
| Dužina stabla – l | 0,7 | 1 |
| Poluprečnici zaobljenja glave – r_1 i r_2 | 10 i 0,5 | 10 |
| Ugao nagiba glave – α | 15° | 0°;15° |

Tabela 2.1: Dimenzije projektovanih zakovičastih kontakata.

Navedene vrednosti dužine stabla kontakata su one koje postoje nakon zakivanja kontakta u noseću strukturu, dok pojedinačni fabrikovani kontakti obično imaju ovu vrednost nešto veću. Sa ciljem optimizacije dimenzija i geometrije bimetalnih kontakata i utvrđivanja uticaja pojedinih efekata na njihovu pouzdanost, usvojena su tri različita prečnika i dva nagiba ugla glave kontakata.

Funkcionisanje električnih kontakata zavisi od mesta njihove ugradnje tako da su projektovani kontakti posmatrani u okviru odgovarajuće noseće strukture. Kod masivnih kontakata to je pločica čije su dimenzije (10 mm × 4 mm × 0,5 mm), dok kod bimetalnih njene dimenzije iznose (15 mm × 6 mm × 0,5 mm). Za materijal noseće strukture uzet je bakar s obzirom da je on osnovni provodni materijal u realizaciji prekidačkih struktura i zadovoljava postavke date u poglavlju 1.5. Poprečni presek sistema kontakt – noseća struktura po zakivanju kontakta je prikazan na slici 2.1, pri čemu su naznačene i površine na koje se primenjuju odgovarajući mehanički i električni uslovi opterećenja (kontaktne površine).



Slika 2.1: Poprečni presek sistema kontakt – noseća struktura sa naznačenim kontaktnim površinama.

Kao što je napred navedeno za izradu masivnih kontakata je izabrano srebro čistoće 99,99%. Ovaj materijal je široko rasprostranjen u primenama gde protiču struje niske

do umerene vrednosti. On poseduje najvišu električnu i termičku provodnost, obezbeđuje nisku otpornost kontaktiranja, dobro se obrađuje, može se lemiti i otporan je na proces oksidacije. Sa druge strane, srebro se lako haba kako mehaničkim, tako i električnim putem (prenos materijala, lučno pražnjenje, zavarivanje), i ima izraženu težnju ka formiranju sulfida.

Kod bimetalnih kontakata osnova je od bakra, dok je kontaktna glava prevučena slojem legure 90%Ag–10%Ni ili 97%Ag–3%Cu dobijene putem sinterovanja. S obzirom da su bimetalni kontakti većih dimenzija zbog primene pri višim strujama, zamena masivne strukture bimetalnom omogućava smanjenje utroška srebra za 60–70%, a time i značajne ekonomske efekte. Legiranjem srebra niklom, odnosno bakrom zadržava se visoka električna i termička provodnost, niska otpornost kontaktiranja i laka obradivost, ali i izražena reaktivnost sa H₂S i formiranje sulfidnog sloja na površini. Sa druge strane, znatno se povišava tvrdoća, otpornost na električno habanje i zavarivanje. Izbor ovih legura kao materijala prevlake kontakata opravdava i sličnost po osobinama sa legurom 90%Ag–10%Cu koja je široko rasprostranjena u izradi električnih kontakata, ali je ekološki nepodobna te je neophodna njena zamena [86].

2.2 Postupak simulacije

Za 3–D simulaciju karakteristika kontakata u okviru odgovarajuće noseće strukture korišćen je računarski program koji složene fizičke fenomene tretira numerički – ANSYS 8.0 [87]. Ovaj program se bazira na metodi konačnih elemenata (eng. Finite Element Analysis) i koristi odgovarajuće adaptivne iterativne tehnike u cilju postizanja optimalnog rešenja. Problemi koji se mogu razmatrati ovim programom obuhvataju širok opseg od jednostavnih, linearnih, statičkih do kompleksnih, nelinearnih, dinamičkih analiza. S obzirom da su pri funkcionisanju električnih kontakata izraženi efekti mehaničkog, električnog i termičkog karaktera, koji su međusobno zavisni, izvršena je tzv. analiza spregnutih domena (eng. coupled–field analysis) direktnom metodom. Ova analiza se realizuje jedinstvenim postupkom simulacije primenom posebnog tipa konačnih elemenata (kod sekvencijalnog metoda vrši se niz sukcesivnih analiza koje pripadaju različitim domenima). Sprega između domena se ostvaruje preko vektora opterećenja i zahteva najmanje dva iteraciona ciklusa. Za ovu svrhu se koristi ANSYS Multiphysics modul koji rešava kompletan set *Maxwell*–ovih jednačina simultano sa jednačinama provođenja i odvođenja toplote i jednačinama elastičnosti materijala.

2.2.1 Teorijska postavka simulacije u spregnutim domenima

Elektromagnetne pojave u prirodi su opisane setom *Maxwell*–ovih jednačina koje imaju diferencijalni oblik:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (2.1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2.2)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_s, \quad (2.3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (2.4)$$

gde je \vec{H} vektor jačine magnetnog polja, \vec{E} vektor jačine električnog polja, \vec{D} vektor jačine električne indukcije, \vec{B} vektor jačine magnetne indukcije, \vec{J} vektor gustine struje, ρ_s zapreminska gustina naelektrisanja i t vreme. Ovaj set jednačina je upotpunjen konstitutivnim vezama koje opisuju ponašanje materijala:

$$\vec{J} = \overset{\leftrightarrow}{\sigma} [\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}], \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \overset{\leftrightarrow}{\epsilon}_e \vec{E}, \quad (2.6)$$

$$\vec{B} = \overset{\leftrightarrow}{\mu} \vec{H}, \quad (2.7)$$

gde su $\overset{\leftrightarrow}{\sigma}$ tenzor specifične električne provodnosti, $\overset{\leftrightarrow}{\epsilon}_e$ tenzor dielektrične konstante, $\overset{\leftrightarrow}{\mu}$ tenzor magnetne propustljivosti i \vec{v} vektor brzine.

U provodnim sredinama kod kojih se magnetni domen ne razmatra jednačine (2.1)–(2.4) se svode na jednačinu kontinuiteta u razvijenom obliku:

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = -\frac{\partial \rho_s}{\partial t}. \quad (2.8)$$

Konstitutivna električna veza između komponenta gustine struje J_x, J_y, J_z i komponenta električnog polja E_x, E_y, E_z ostvaruje se preko transportnih jednačina:

$$J_x = \sigma_{xx} E_x, \quad (2.9)$$

$$J_y = \sigma_{yy} E_y, \quad (2.10)$$

$$J_z = \sigma_{zz} E_z, \quad (2.11)$$

gde su $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ vrednosti specifične električne provodnosti u x, y i z pravcu, respektivno.

Jednačina protoka toplote objedinjuje prvi zakon termodinamike sa *Fourier*–ovim zakonom i u razvijenom obliku je data izrazom:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_{qx} \frac{\partial T}{\partial x} + v_{qy} \frac{\partial T}{\partial y} + v_{qz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q_v + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2.12)$$

gde je ρ gustina materijala, c specifična toplota materijala, q_v brzina generisanja toplote po jedinici zapremine, v_{qx}, v_{qy}, v_{qz} komponente vektora brzine prenosa toplote, k_x, k_y, k_z termička provodnost materijala u x, y i z pravcu, respektivno, dok je temperatura $T = f(x, y, z, t)$. Jednačinu (2.12) prate tri moguća granična uslova:

1. Definisana vrednost temperature na određenoj površini;
2. Definisana vrednost protoka toplote na određenoj površini;
3. Definisani uslovi konvektionog odvođenja toplote sa određene površine (*Newton*–ov zakon hlađenja) na osnovu izraza:

$$\vec{q} \circ \hat{n} = h_f (T_S - T_B), \quad (2.13)$$

pri čemu je \vec{q} vektor toplotnog fluksa, h_f koeficijent konvekcije, T_S temperatura posmatrane površine, T_B temperatura okoline i \hat{n} jedinični vektor normale posmatrane površine.

Veza termičkog sa električnim domenom ostvaruje se preko q_v , gde je uključeno i generisanje toplote usled proticanja struje J (*Joule*-ova topota) i preko temperaturene zavisnosti specifične električne provodnosti $\sigma = f(T)$.

Strukturni domen analize opisan je za slučaj linearnih materijala jednačinama elastičnosti koje daju vezu između naprezanja i deformacije kako pri istežanju ili sabijanju, tako i pri smicanju materijala. U eksplicitnom obliku to je sistem od šest jednačina:

$$\epsilon_x = \alpha_x \Delta T + \frac{S_x}{E_{m_x}} - \frac{\nu_{xy} S_y}{E_{m_x}} - \frac{\nu_{xz} S_z}{E_{m_x}}, \quad (2.14)$$

$$\epsilon_y = \alpha_y \Delta T - \frac{\nu_{xy} S_x}{E_{m_x}} + \frac{S_y}{E_{m_y}} - \frac{\nu_{yz} S_z}{E_{m_y}}, \quad (2.15)$$

$$\epsilon_z = \alpha_z \Delta T - \frac{\nu_{xz} S_x}{E_{m_x}} - \frac{\nu_{yz} S_y}{E_{m_y}} + \frac{S_z}{E_{m_z}}, \quad (2.16)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{S_{xy}}{G_{xy}}, \quad (2.17)$$

$$\epsilon_{yz} = \frac{S_{yz}}{G_{yz}}, \quad (2.18)$$

$$\epsilon_{xz} = \frac{S_{xz}}{G_{xz}}, \quad (2.19)$$

gde su $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ vrednosti direktne deformacije, S_x, S_y, S_z vrednosti direktnog naprezanja, $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ koeficijenti termičkog širenja, $E_{m_x}, E_{m_y}, E_{m_z}$ vrednosti modula elastičnosti u x, y i z pravcu respektivno, a $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{xz}$ vrednosti deformacije smicanja, S_{xy}, S_{yz}, S_{xz} vrednosti naprezanja smicanjem, G_{xy}, G_{yz}, G_{xz} moduo smicanja, $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$ *Poisson*-ovi koeficijenti u xy, yz i xz ravnima, respektivno. Izrazima (2.14)–(2.16) je preko koeficijenta termičkog širenja i temperaturene razlike $\Delta T = T - T_{ref}$ definisana sprega između termičkog i mehaničkog domena, gde je T_{ref} referentna temperatura bez efekata naprezanja. Ukoliko moduli smicanja u izotropnim materijalima nisu definisani njihove vrednosti se izračunavaju na osnovu relacije:

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = \frac{E_{m_x}}{2(1 + \nu_{xy})}. \quad (2.20)$$

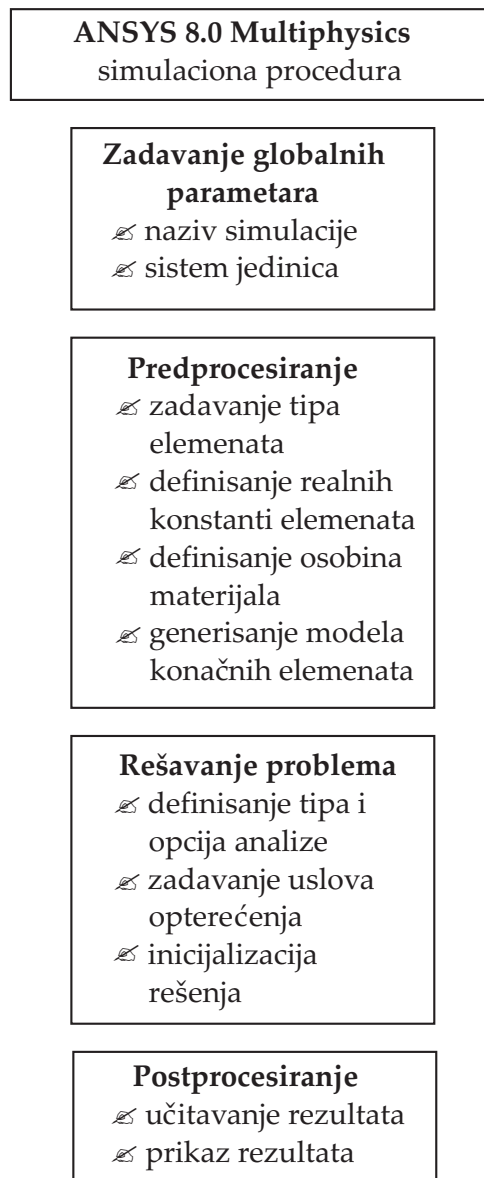
2.2.2 Koraci simulacione procedure

Postupak simulacije ANSYS 8.0 Multyphysics modulom ubuhvata tri osnovna koraka:

1. Izrada modela;
2. Definisane uslova opterećenja i dobijanje rešenja;
3. Pregled rezultata.

Ovi koraci se realizuju kroz odgovarajući korisnički interfejs koji uključuje zadavanje globalnih parametara simulacije, predprocesiranje, rešavanje problema i postprocesiranje. Na slici 2.2 su prikazani pojedinačni elementi simulacione procedure.

Zadavanje imena simulacije predstavlja preporučeni, ali ne i zahtevani korak u postupku simulacije. Definisane primenjenog sistema jedinica je neophodno s obzirom da



Slika 2.2: Simulaciona procedura ANSYS 8.0 Multiphysics modulom.

program može da radi sa proizvoljnim sistemom jedinica ukoliko su one konzistentne za sve ulazne veličine.

Predprocesiranje se vrši kroz PREP7 modul i osnovni deo predstavlja zadavanje tipa konačnih elemenata za postupak simulacije i definisanje njegovih realnih konstanti. Biblioteka elemenata programa ANSYS sadrži preko 150 tipova konačnih elemenata svrstanih u 25 kategorija. Tipom elementa su definisani njegova dimenzionalnost (2-D ili 3-D) i set stepeni slobode koji određuju simulacioni domen. Realne konstante elementa su osobine koje zavise od njegovog tipa, ali nisu neophodne kod svih elemenata. Različiti elementi istog tipa mogu imati različite vrednosti realnih konstanti.

U postupku predprocesiranja definišu se i osobine materijala koje mogu da budu linearne (konstantne ili temperaturno zavisne; izotropne ili ortotropne) i nelinearne (predstavljene tabelarno, matricno ili odgovarajućim aproksimacijama). Svaki set osobina materijala ima jedinstveni referentni broj, tako da je za isti materijal moguće definisati više specifičnih setova osobina. Pri tome se osobine materijala klasifikuju na fizičke, strukturne (mehaničke), termičke, električne i magnetne.

Generisanje modela konačnih elemenata simulirane strukture podrazumeva definisanje čvorova i elemenata koji adekvatno opisuju razmatranu strukturu. Postoje dva načina generisanja modela konačnih elemenata: zapreminsko modeliranje i direktno modeliranje. Kod zapreminskog modeliranja opisuje se geometrijski oblik strukture, dok program vrši automatsko generisanje mreže čvorova unutar nje na osnovu zadatih parametara oblika i veličine elemenata. Kod direktnog modeliranja neposredno se zadaju lokacije čvorova mreže i veze između njih. Ova procedura u programu ANSYS je podržana mogućnošću uvoza mreže čvorova i elemenata strukture generisane u nekom drugom CAD programu.

Postupak rešavanja problema inicijalno zahteva definisanje tipa analize na osnovu uslova opterećenja i željenih rezultata simulacije. Dostupni tipovi analize su: statička (stacionarna), prelazna, harmonijska, modalna, spektralna, podstrukturalna i analiza izvijanja. Opcije analize omogućavaju prilagođavanje analize razmatranom problemu i obuhvataju način rešavanja, metod numeričke integracije, uključivanje određenih fizičkih pojava u razmatranje ili ne i slično.

Uslovi opterećenja u programu ANSYS uključuju granične uslove, kao i opterećenja generisana spoljnim ili unutrašnjim putem. Njihova osnovna podela je u šest kategorija: ograničenja stepena slobode, sile, površinsko opterećenje, zapreminsko opterećenje, inerciono i opterećenje spregnutih polja. Većina opterećenja se može primeniti na zapreminski model (na ključne tačke, linije i površine) ili na model konačnih elemenata (na čvorove i elemente). Za uslove opterećenja su vezani pojmovi *korak opterećenja* (set opterećenja za koje se traži rešenje) i *potkorak opterećenja* (pojedini segmenti opterećenja u okviru jedinstvenog koraka). Opcijama koraka opterećenja definiše se broj potkoraka, vreme na kraju koraka, kao i kontrola oblika izlaznih podataka. Zavisno od tipa analize, opcije koraka opterećenja ne moraju biti obavezni ulazni parametri analize. Tip analize, njene opcije, kao i uslovi opterećenja mogu se definisati i kroz predprocesorski modul PREP7.

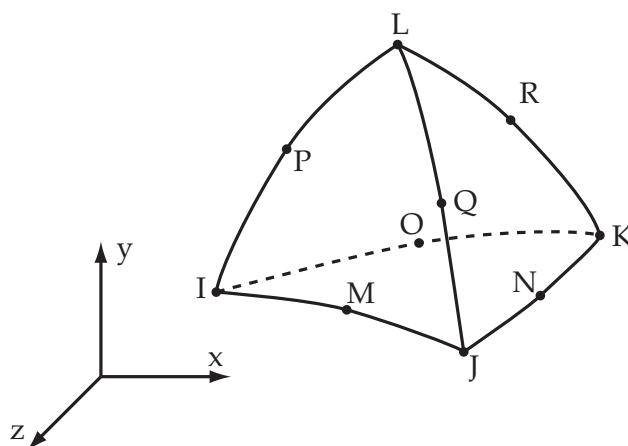
Inicijalizacijom rešenja program preuzima informacije o modelu i uslovima opterećenja iz odgovarajuće baze i proračunava rešenje. Dobijeni rezultati se smeštaju u specificiranu datoteku ili bazu podataka.

Za pregled rezultata simulacije koriste se postprocesorski moduli POST1 (opšte namene) i POST26 (hronološki). Modulom POST1 je moguć pregled rezultata u određenom potkoraku opterećenja (vremenskom trenutku) u celoj ili izabranom delu geometrije sis-

tema. Za interpretaciju rezultata analize je dostupno konturno iscrtavanje, prikazivanje deformisane strukture i tabelarno prikazivanje. Modul POST26 omogućava pregled rezultata u određenim tačkama modela tokom svih potkoraka opterećenja. Grafički prikaz je kroz dijagram zavisnosti razmatrane veličine tokom vremena, dok je numeričko prikazivanje tabelarnog tipa. Kombinacija oba postprocesorska modula daje mogućnost animacionog prikaza rezultata simulacije kroz vremensku zavisnost određene veličine u okviru cele simulirane strukture.

2.2.3 Parametri simulacije razmatranih struktura

Simulacija električnih kontakata u okviru odgovarajuće noseće strukture je izvršena za stacionarni režim i, usled spregnutosti razmatranih domena, uključuje nelinearne iterativne tehnike poput *Newton–Raphson*–ovog metoda. Izabran je SOLID98 tip konačnih elemenata koji omogućava 3–D elektromagnetnu, termičku, strukturnu i piezoelektričnu spregnutu analizu. Ovaj tip elemenata predstavlja tetraedar definisan sa 10 čvorova u kojima postoji do 6 stepeni slobode. Geometrija osnovnog elementa SOLID98 sa označenim čvorovima je prikazana na slici 2.3.



Slika 2.3: Geometrija konačnog elementa tipa SOLID98 [87].

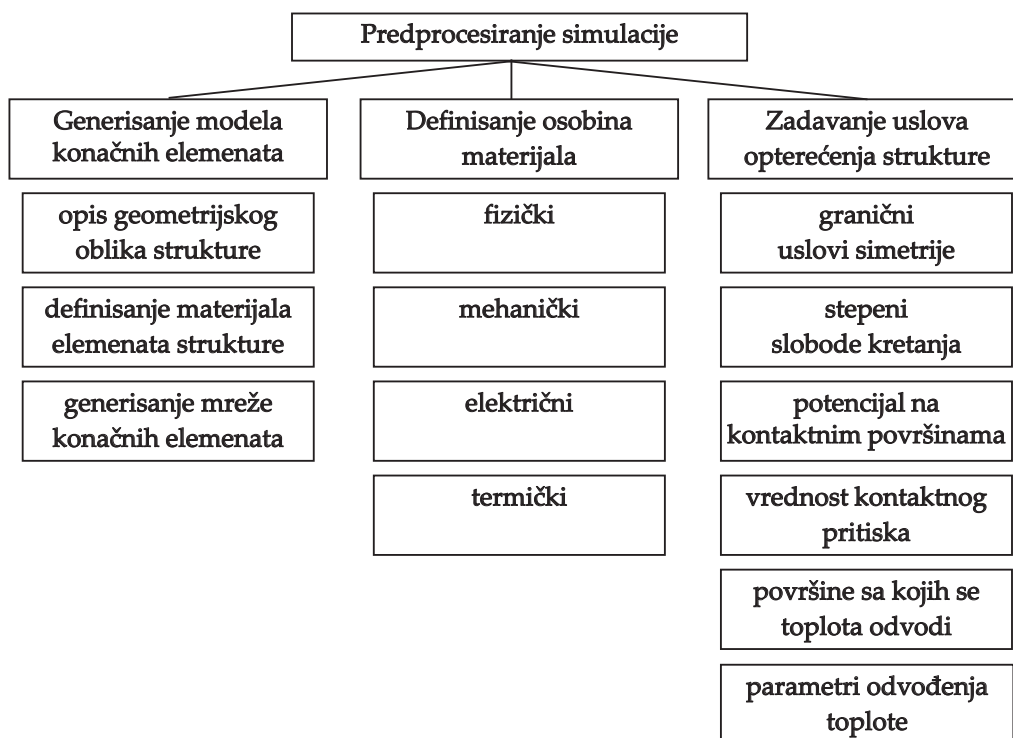
Stepeni slobode u čvorovima su: pomeraji po x , y i z koordinatama, temperatura, električni potencijal i magnetni skalar potencijal. Vrednosti opterećenja u čvorovima određene su stepenima slobode i vrednostima primenjene sile, protoka toplote, električne struje ili naelektrisanja i magnetnog fluksa. Opterećenje u elementima obuhvata vrednosti pritiska, toplotnog fluksa ili konvekcije, radijacije i *Maxwell*–ove sile. Izlazne veličine koje ovaj tip elemenata obezbeđuje su vrednosti definisanih stepeni slobode, sile reakcije, protoka toplote, električne struje i magnetnog fluksa u čvorovima, kao i vrednosti naprezanja, deformacije, električnog potencijala i *Joule*–ove toplote unutar modela. U razmatranom slučaju magnetni domen analize nije od interesa, tako da se ne vrši proračun magnetnih veličina. SOLID98 tip konačnih elemenata ne zahteva zadavanje vrednosti realnih konstanti.

Kroz odgovarajući korisnički interfejs zadati su ulazni parametri predprocesiranja simulirane strukture, pri čemu su specifični koraci naznačeni na slici 2.4.

Za generisanje modela konačnih elemenata korišćen je pristup zapreminskog modeliranja, dok su vrednosti fizičkih, mehaničkih, električnih i termičkih parametara kontaktnih materijala korišćenih u simulaciji prikazane u tabeli 2.2.

| Materijal | Cu | Ag | 90%Ag– 10%Ni | 97%Ag– 3%Cu | 90%Ag– 10%CdO |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Gustina (kg/m ³) | 8960 | 10500 | 10300 | 10400 | 10200 |
| <i>Joung</i> -ov modul elastičnosti (GPa) | 130 | 83 | 95 | 84 | 80 |
| <i>Poisson</i> -ov koeficijent | 0,34 | 0,37 | 0,36 | 0,37 | 0,36 |
| Tvrdoća po <i>Vickers</i> -u (MN/m ²) | 40 | 26 | 65 | 45 | 70 |
| Specifična električna otpornost (Ωm) | $1,69 \cdot 10^{-8}$ | $1,62 \cdot 10^{-8}$ | $1,89 \cdot 10^{-8}$ | $1,75 \cdot 10^{-8}$ | $2,08 \cdot 10^{-8}$ |
| Temperaturni koeficijent specifične električne otpornosti (1/K) | $4,29 \cdot 10^{-3}$ | $4,10 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| Koeficijent linearnog termičkog širenja (1/K) | $16,5 \cdot 10^{-6}$ | $18,9 \cdot 10^{-6}$ | $18,9 \cdot 10^{-6}$ | $18,9 \cdot 10^{-6}$ | $18,9 \cdot 10^{-6}$ |
| Termička provodnost (W/mK) | 401 | 419 | 310 | 350 | 330 |

Tabela 2.2: Fizički, mehanički, električni i termički parametri razmatranih kontaktnih materijala [69,70,72].



Slika 2.4: Koraci postupka predprocesiranja simulacije.

Uslovi opterećenja simulirane strukture zadati su kroz granične uslove simetrije, ograničenje mehaničkog kretanja strukture, vrednosti površinskog električnog i mehaničkog opterećenja i parametre termičkog hlađenja.

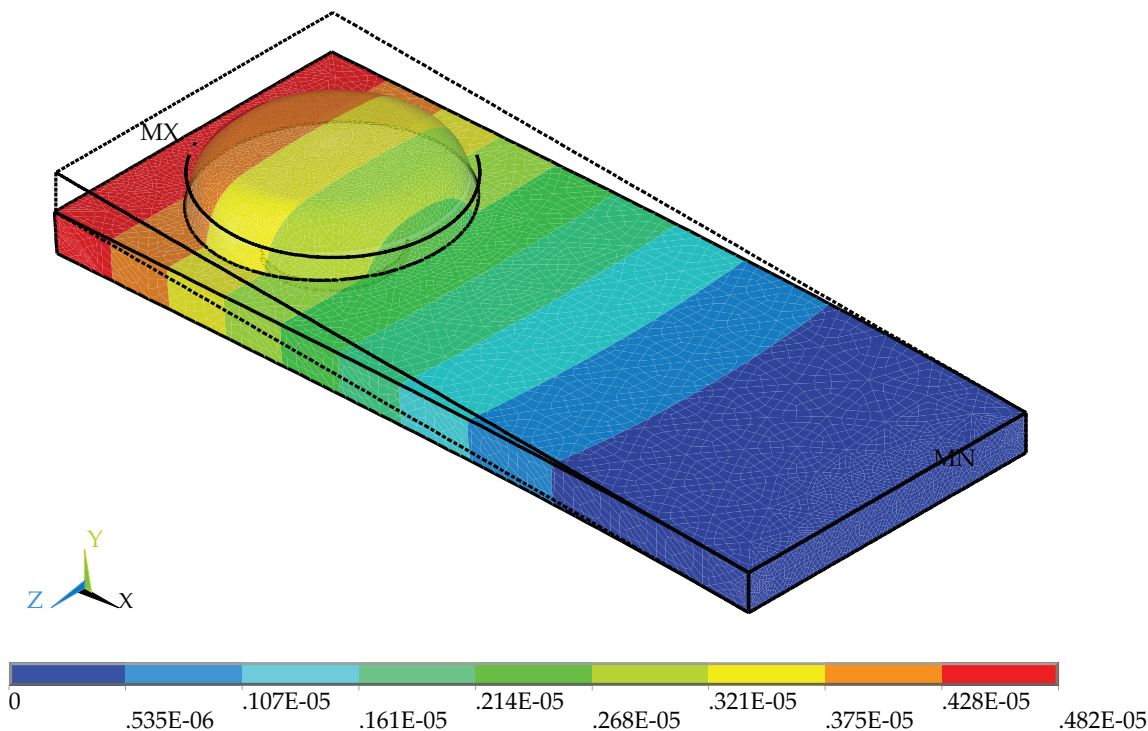
Usled simetričnosti razmatranih struktura simulacije su vršene za polovinu sistema bimetalni kontakt noseća struktura koji je i prikazan na slici 2.1, pri čemu ravan preseka predstavlja granični uslov simetrije. Ograničenje mehaničkog kretanja strukture kod masivnih Ag kontakata je samo na kontaktnoj površini 2. Kod bimetalnih kontakata su razmatrana dva načina ograničenja mehaničkog kretanja odnosno učvršćivanja noseće strukture: a) samo na kontaktnoj površini 2 i b) na kontaktnoj površini 2 i sa donje strane pločice, čime je onemogućeno njeno savijanje pri dejstvu sile kontaktiranja. Uslovima električnog opterećenja je definisana vrednost potencijala na kontaktnoj površini 2, koja je držana na nultom potencijalu, dok je vrednost struje koja protiče kroz kontaktnu površinu 1 menjana u opsegu 0,15 A do 15 A kod masivnih, odnosno, 0,16 A do 45 A kod bimetalnih kontakata. Ovim vrednostima struje odgovara razlika potencijala na kontaktnim površinama $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$ V kod masivnih i $1 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$ V kod bimetalnih kontakata. Mehaničko opterećenje je definisano kontaktnim pritiskom koji deluje na kontaktnu površinu 1. Vrednosti kontaktnog pritiska su ekvivalentne sili kontaktiranja od 0,15 N/A za struje do 1 A i 0,2 N/A za više vrednosti struja kod masivnog kontakta i 0,36 N/A za sve vrednosti struje kod bimetalnih kontakata. Parametri termičkih uslova opterećenja su određeni konvekcionim načinom hlađenja sistema preko slobodnih površina kontakata i noseće strukture. Smatra se da je sistem u vazduhu čija je temperatura 300 K i da je vrednost koeficijenta konvekcije 28,4 W/m²K.

2.3 Raspodele električnih, termičkih i mehaničkih veličina unutar električnih kontakata

Kao rezultati 3–D simulacije električnih kontakata dobijene su raspodele različitih električnih, termičkih i mehaničkih veličina unutar kontakata. Zavisno od prirode veličina, njihova grafička prezentacija ima zapreminsko–konturni ili vektorski oblik. Veličine koje su od značaja za projektovanje i optimizaciju električnih kontakata su vrednosti deformacije strukture, temperature, električnog potencijala, gustine električne struje (ekvivalent je gustina generisane *Joule*–ove toplote) i ekvivalentnog naprezanja.

2.3.1 Masivni Ag kontakti

Kao što je navedeno u poglavlju 2.1, masivni Ag kontakti su razmatrani u okviru noseće strukture u vidu provodne pločice od bakra koja je učvršćena na kontaktnoj površini 2. Na slici 2.5 je prikazana deformacija sistema pri proticanju struje od 0,8 A, odnosno pri primenjenoj sili kontaktiranja od 0,12 N.

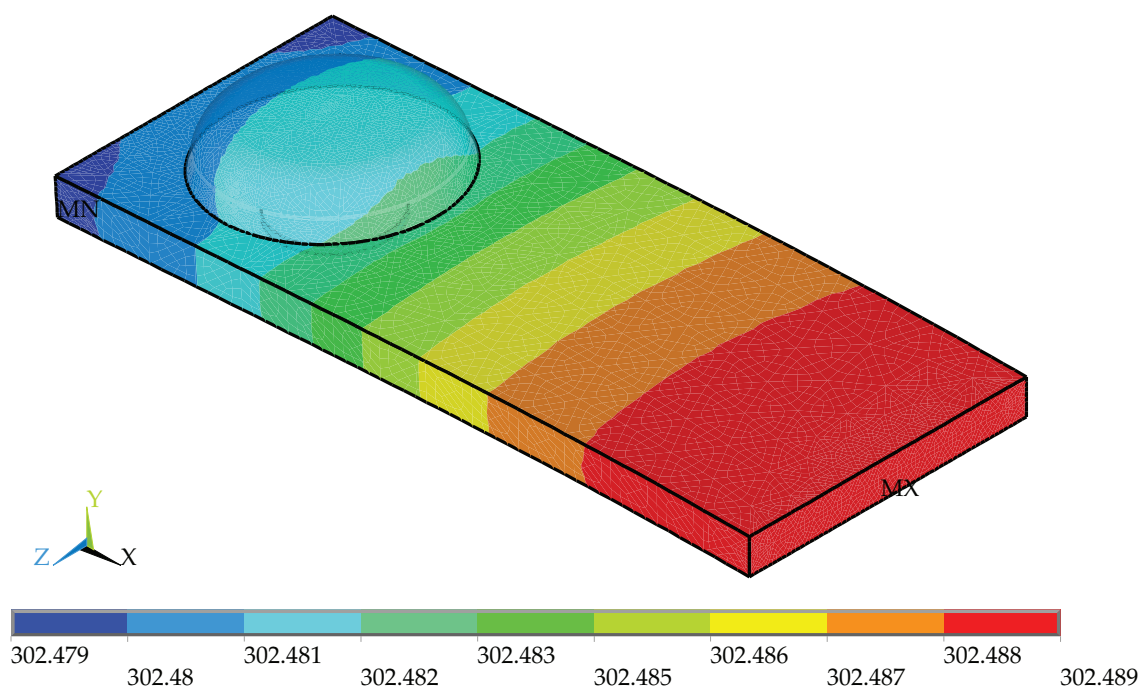


Slika 2.5: Deformacija sistema sa masivnim Ag kontaktom pri proticanju struje od 0,8 A.

Deformacija sistema je određena načinom učvršćivanja noseće strukture, a vrednosti definisane prvenstveno elastičnim osobinama primenjenih materijala. Na slici je prikazan i sistem bez dejstva opterećenja, a maksimalno savijanje na slobodnom kraju pločice iznosi 4,8 μm . Sama noseća struktura je primer elastične pločice opisane u poglavlju 1.5, tako da se iz aproksimativnog izraza (1.3) za njeno savijanje u delu gde deluje sila kontaktiranja preko tela kontakta dobija vrednost od 3,8 μm . Na osnovu raspodele sa slike 2.5 ova vrednost iznosi 3,5 μm . Razlika u odnosu na teorijsku vrednost je posledica realno niže vrednosti sile koja deluje na pločicu usled njenog raspodeljenog dejstva, kao i elastičnih osobina materijala kontakta (u ovom slučaju srebra). Izmenjene dimenzije sistema usled termičkog širenja dolaze do izražaja tek pri visokim primenjenim strujama

i pri tome su nekoliko redova veličine manje od deformacija usled mehaničkog dejstva, te ne utiču na prikazanu raspodelu. Deformacija sistema ima isti kvalitativni izgled i za više vrednosti primenjene struje, odnosno sile kontaktiranja, uz proporcionalno izmenjene kvantitativne vrednosti.

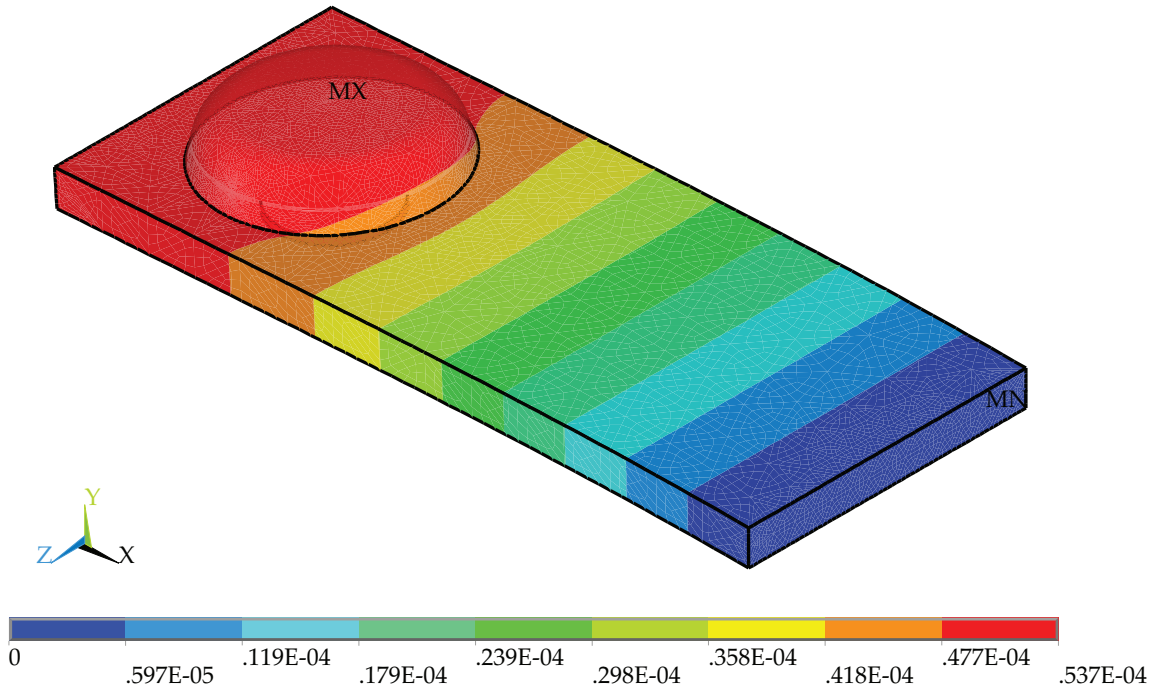
Raspodela temperature u strukturi zavisi od uslova opterećenja, temperaturnog koeficijenta specifične električne otpornosti i termičke provodnosti materijala, slobodnih površina i načina odvođenja toplote sa njih. Simulacije su pokazale da se, usled visoke električne i termičke provodnosti primenjenih materijala i velikih površina sistema sa kojih se toplota odvodi, raspodela temperature u kontaktima za date uslove napajanja može smatrati konstantnom. Kao primer je na slici 2.6 prikazana raspodela temperature u sistemu pri proticanju struje od 10 A i primenjenoj sili kontaktiranja od 2 N, pri čemu je raspon promene temperature svega 0,01 K (pri nižim strujama je još manji).



Slika 2.6: Raspodela temperature u sistemu sa masivnim Ag kontaktom pri proticanju struje od 10 A.

Na slici 2.7 je prikazana raspodela električnog potencijala u sistemu pri proticanju struje od 0,8 A. Razlika potencijala između kontaktnih površina je $5,4 \cdot 10^{-5}$ V, pri čemu je evidentno da su ekvipotencijalne površine određene geometrijom strukture i visokom električnom i termičkom provodnošću kontaktnih materijala. Raspodele električnog potencijala pri višim strujama su kvalitativno identične uz adekvatno izmenjene vrednosti na kontaktnoj površini 1.

Vektorska prezentacija raspodele gustine struje u sistemu sa masivnim Ag kontaktom pri proticanju struje od 0,8 A je prikazana na slici 2.8. Dat je i prikaz kroz presek strukture, pri čemu se uočavaju mesta najveće gustine struje koja su istovremeno oblasti u kojima je lokalno *Joule*-ovo zagrevanje najizraženije. Ove oblasti su "vruće" tačke u strukturi, gde se može očekivati inicijalizacija različitih termički aktivirajućih degradacionih procesa, poput zavarivanja i migracije metala. U razmatranoj strukturi te oblasti su na centralnom delu glave kontakta i na spoju glave i stabla kontakta i imaju vrednost od $6 \cdot 10^5$ A/m². Za više vrednosti struje raspodele su identične uz proporcionalno uvećanje vrednosti intenziteta vektora gustine struje.



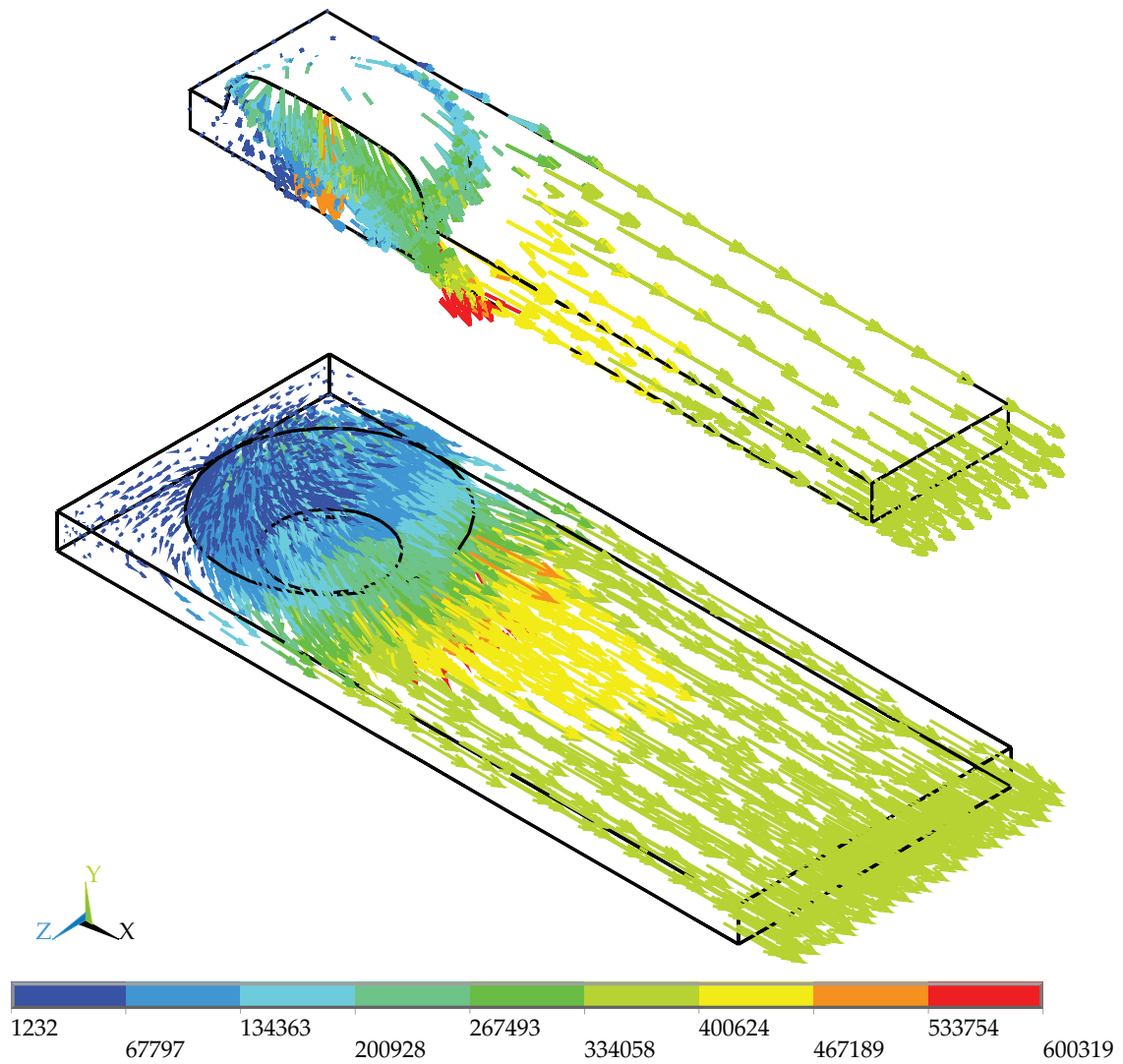
Slika 2.7: Raspodela električnog potencijala u sistemu sa masivnim Ag kontaktom pri proticanju struje od 0,8 A.

Delovanjem kontaktnog pritiska na glavu kontakta, kao i usled efekata termičkog širenja materijala prouzrokovanog *Joule*-ovim zagrevanjem, u kontaktima se stvara ekvivalentno naprezanje čija je raspodela u razmatranom sistemu za vrednost struje opterećenja od 0,8 A, odnosno pri sili kontaktiranja od 0,12 N, prikazana na slici 2.9. S obzirom da je sloboda kretanja ovakvog sistema ograničena učvršćenom kontaktnom površinom 2, maksimalno naprezanje u sistemu je u pločici noseće strukture. Saglasno razmatranjima datim u poglavlju 1.5, maksimalno naprezanje je na gornjoj i donjoj površini pločice uz fiksiranu ivicu i ima vrednost od 6 MPa. Za više vrednosti struje raspodela ekvivalentnog naprezanja je istovetna uz više maksimalne vrednosti (za struju od 10 A maksimalna vrednost naprezanja je 100 MPa).

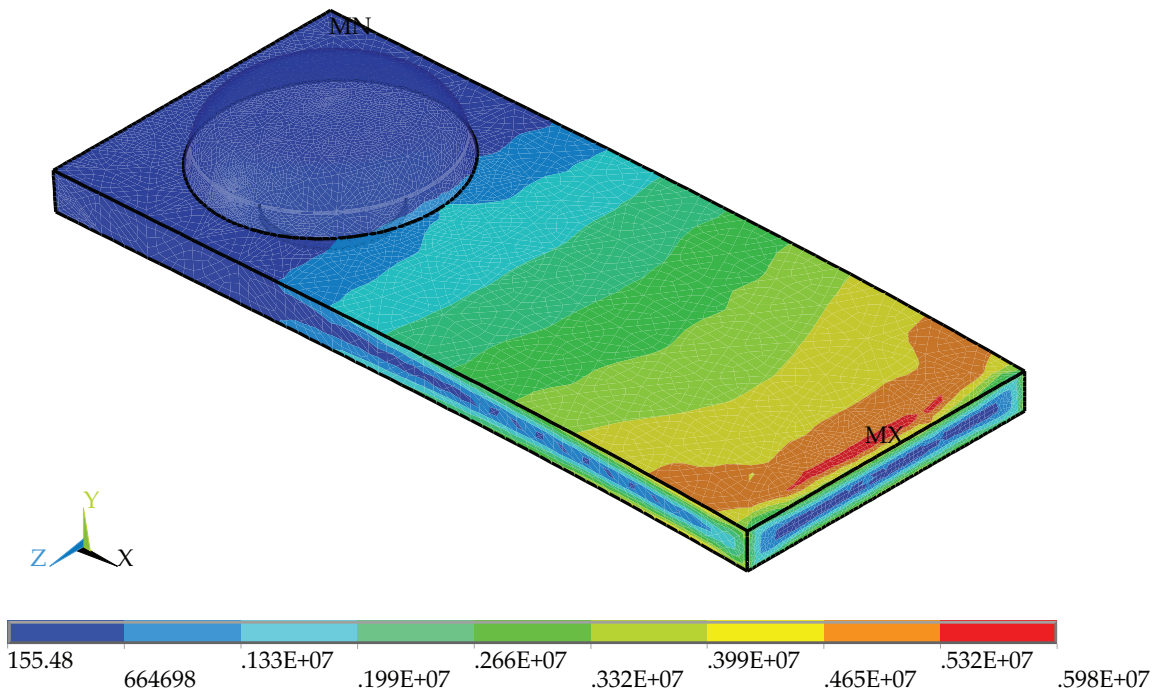
Raspodela ekvivalentnog naprezanja u samim masivnim kontaktima se detaljnije uočava sa slike 2.10 koja predstavlja uvećan prikaz raspodele sa slike 2.9. Maksimalna vrednost ekvivalentnog naprezanja postoji na ivici kontakta uz noseću strukturu u pravcu maksimalne gustine struje i ima vrednost 1,4 MPa. Simulacijom je utvrđeno da je ovo mesto najvećeg naprezanja u kontaktu za ceo opseg primenjenih struja. U uslovima eksploatacije ekvivalentno naprezanje u samim kontaktima sadrži i određenu vrednost zaostale napregnutosti kao posledicu procesa zakivanja. Vrednost zaostale napregnutosti nije moguće eksplicitno definisati, tako da se njen uticaj razmatra kroz tolerancije u postupku proizvodnje.

2.3.2 Bimetalni kontakti

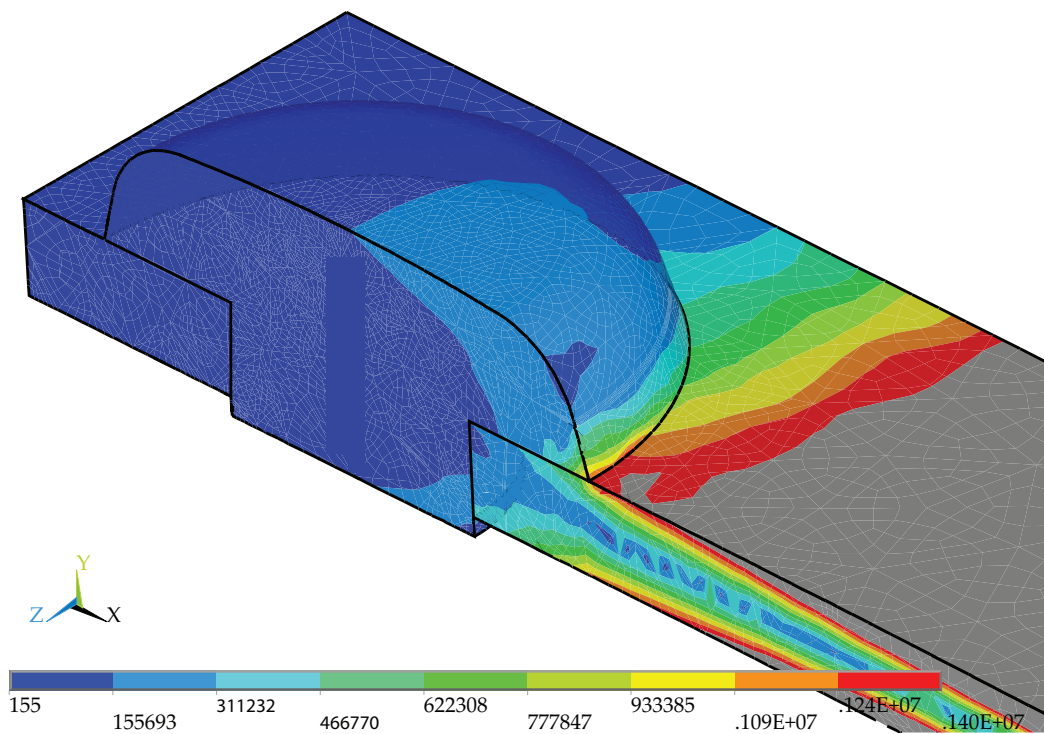
Bimetalni kontakti su posmatrani u okviru noseće strukture koju čini pločica od bakra dimenzija (15 mm × 6 mm × 0,5 mm) čije je mehaničko kretanje ograničeno na dva načina: a) samo na kontaktnoj površini 2 i b) na kontaktnoj površini 2 i sa donje strane pločice, čime su istovremeno i smanjene površine sa kojih se odvija termičko



Slika 2.8: Raspodela gustine struje u vektorskom obliku u sistemu sa masivnim Ag kontaktom pri proticanju struje od 0,8 A.



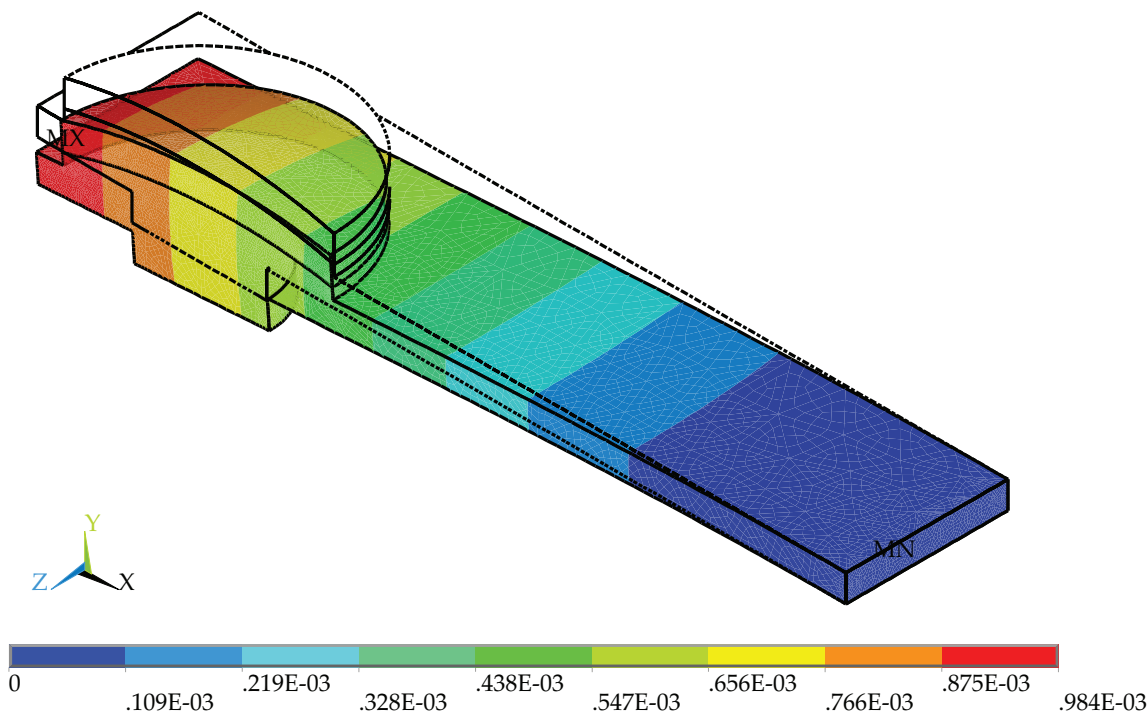
Slika 2.9: Raspodela ekvivalentnog naprezanja u sistemu sa masivnim Ag kontaktom pri proticanju struje od 0,8 A.



Slika 2.10: Raspodela ekvivalentnog naprezanja u masivnom Ag kontaktu pri proticanju struje od 0,8 A.

hlađenje sistema. Razmatrani su kontakti kod kojih materijal prevlake čine legure: 90%Ag–10%Ni, 97%Ag–3%Cu (tvrdo srebro) i 90%Ag–10%CdO.

Na slici 2.11 je prikazana deformacija sistema sa bimetalnim kontaktom prečnika glave 5 mm čiji je materijal prevlake Ag–Ni. Mehaničko kretanje sistema određuje fiksirana kontaktna površina 2, dok se na kontaktnu površinu 1 deluje silom kontaktiranja od 10,8 N koja odgovara jačini struje od 30 A.

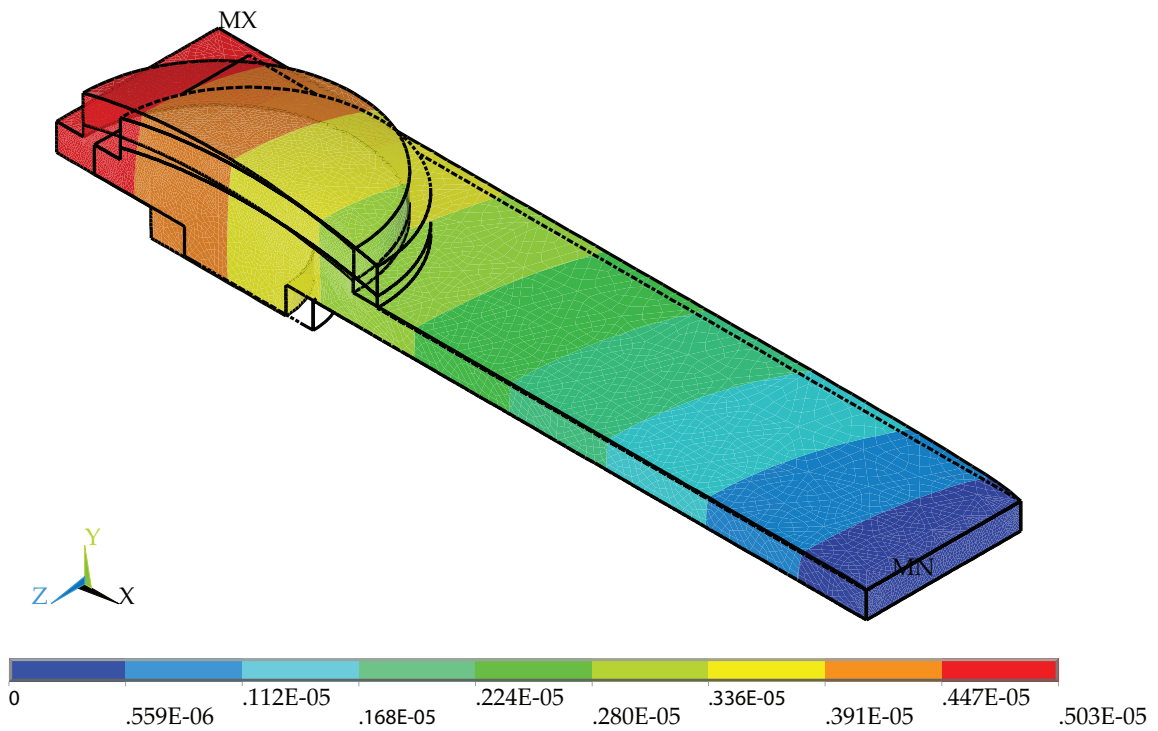


Slika 2.11: Deformacija sistema sa bimetalnim Cu/Ag–Ni kontaktom pri proticanju struje od 30 A.

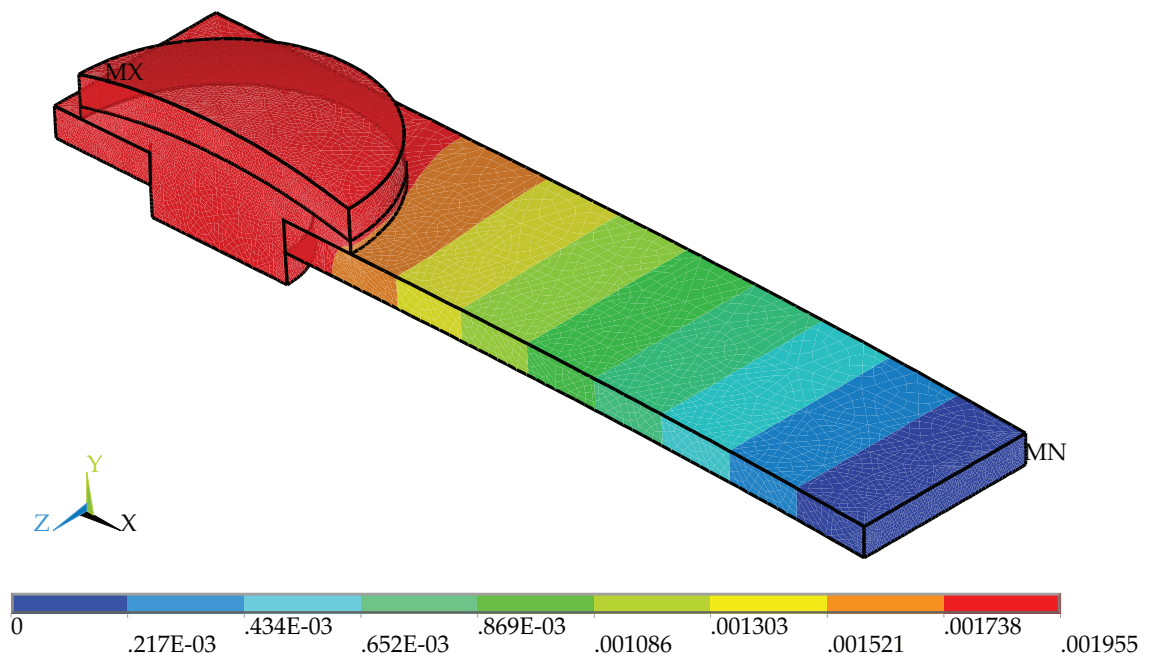
Maksimalno savijanje pločice na slobodnom kraju je približno 1 mm. Analogno kao kod masivnih kontakata, noseća struktura je primer elastične pločice, tako da se iz aproksimativnog izraza (1.3) za njeno savijanje u delu gde deluje sila kontaktiranja preko tela kontakta dobija vrednost od 764 μm . Raspodela sa slike 2.11 za ovu vrednost daje 710 μm . Razlika između teorijske i simulirane vrednosti proističe iz realno niže vrednosti sile koja deluje na pločicu usled njenog raspodeljenog dejstva kao i elastičnih osobina materijala tela i prevlake kontakta (bakra i legure Ag–Ni). I u ovom slučaju primarni efekat deformisanja je usled dejstva mehaničke sile, dok su efekti termičkog širenja drugog reda. Sa druge strane, u sistemima kod kojih je pločica osim na kontaktnoj površini 2 dodatno učvršćena sa donje strane, postoji preraspodela dejstva sile kontaktiranja sa kontaktne površine 1 na celu strukturu kontakta, tako da su efekti deformisanja usled dejstva kontaktnog pritiska i termičkog širenja ekvivalentni. Kvantitativno su deformacije sistema reda μm , što se uočava sa slike 2.12 koja prikazuje deformaciju sistema sa bimetalnim Cu/Ag–Cu kontaktom pri jačini struje od 30 A i dvostrukim ograničenjem slobode kretanja.

U sistemima sa bimetalnim kontaktima kao i u slučaju masivnih kontakata, raspodela temperature ima uniforman karakter. Odgovarajuća vrednost temperature u kontaktima zavisi od materijala prevlake, primenjene struje i načina učvršćivanja noseće strukture.

Raspodela električnog potencijala u sistemu sa bimetalnim Cu/Ag–Ni kontaktom pri struji od 30 A je prikazana na slici 2.13. Uočljivo je da je raspodela uslovljena geometrijom



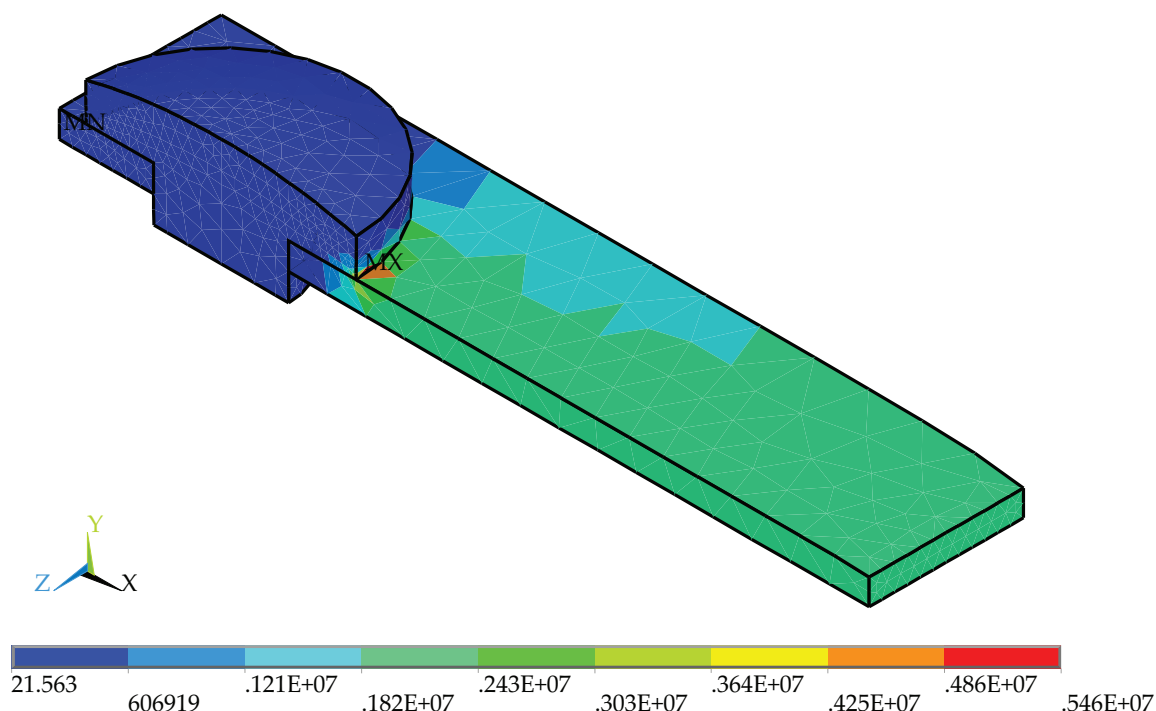
Slika 2.12: Deformacija sistema sa bimetalnim Cu/Ag–Cu kontaktom pri proticanju struje od 30 A i dvostrukom ograničenju slobode kretanja.



Slika 2.13: Raspodela električnog potencijala u sistemu sa bimetalnim Cu/Ag–Ni kontaktom pri proticanju struje od 30 A.

sistema, pri čemu je razlika potencijala između kontaktnih površina 1,95 mV. U sistemima sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja postoji identična raspodela potencijala sa neznatno izmenjenim vrednostima uslovljenim drugačijim termičkim uslovima rada.

Raspodela gustine struje, a analogno tome i raspodela *Joule*-ove toplote, u sistemima sa bimetalnim kontaktima za oba slučaja ograničenja slobode kretanja ima gotovo istovetan oblik za ceo opseg razmatranih struja. Za sistem sa bimetalnim Cu/Ag-Cu kontaktom, pri struji od 30 A i dvostrukim ograničenjem slobode kretanja, raspodela generisane *Joule*-ove toplote je prikazana na slici 2.14.

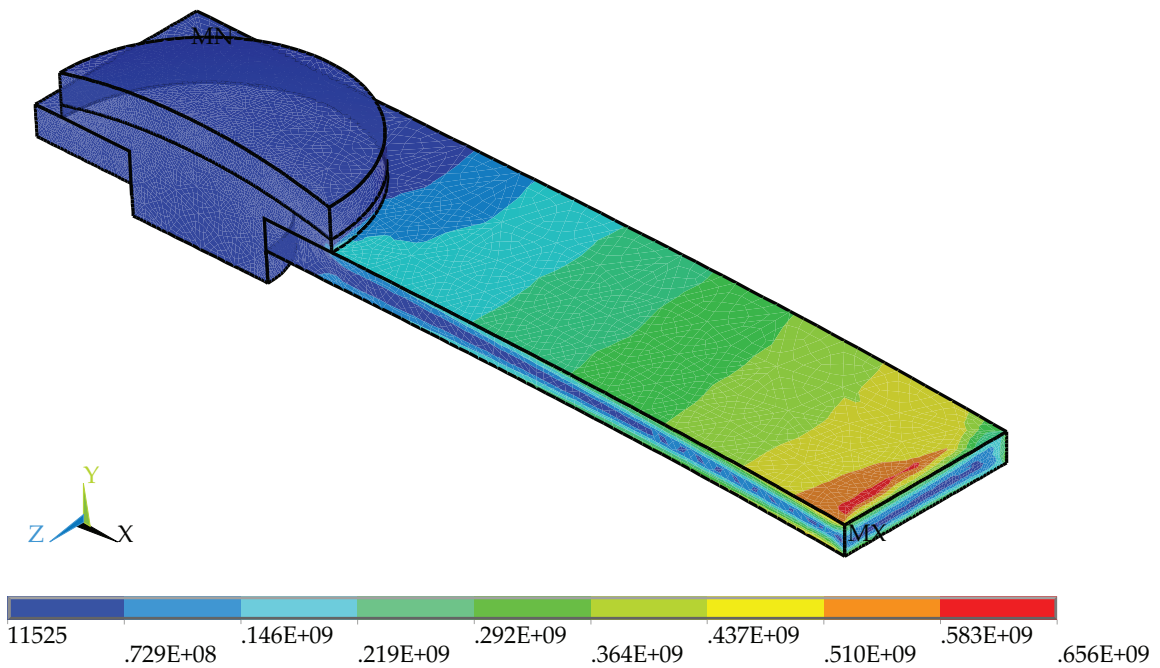


Slika 2.14: Raspodela generisane *Joule*-ove toplote u sistemu sa bimetalnim Cu/Ag-Cu kontaktom pri proticanju struje od 30 A i dvostrukom ograničenju slobode kretanja.

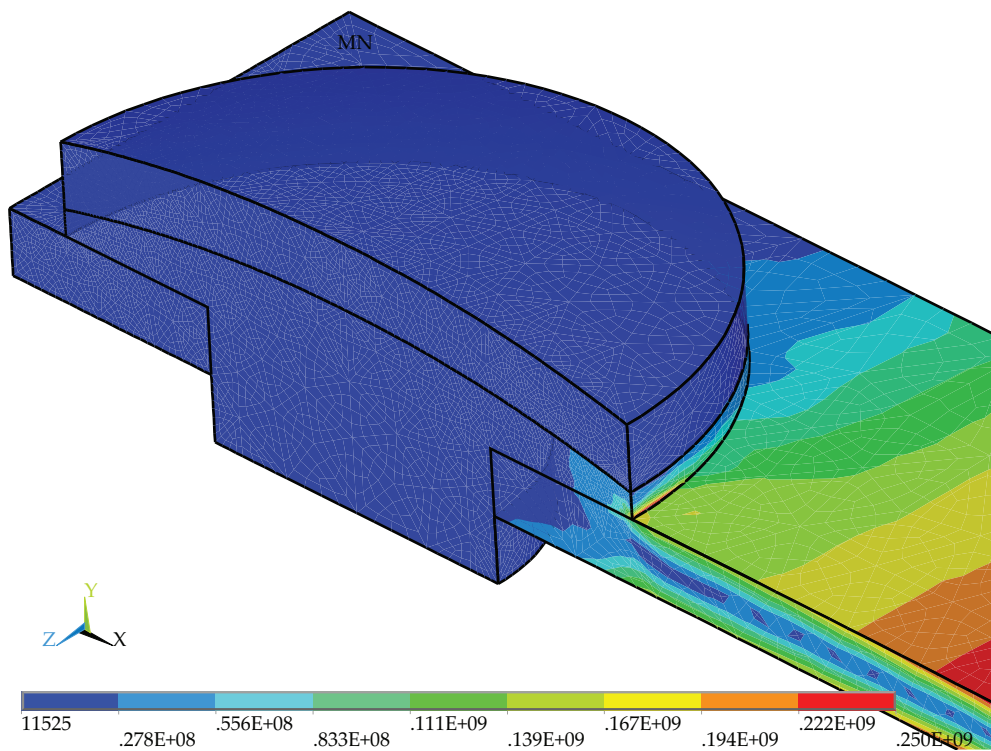
Mesto najviše generisane toplote (istovremeno i mesto maksimalne gustine struje) je na glavi kontakta uz spoj sa nosećom strukturom i ima vrednost $5,5 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$. Ovo je oblast potencijalnog nastanka termički generisanih degradacionih efekata i izobličenja strukture.

Ekvivalentno naprezanje u sistemima kod kojih je sloboda kretanja ograničena kontaktnom površinom prvenstveno je posledica dejstva kontaktnog pritiska i najizraženije je u pločici noseće strukture, kao što se može uočiti sa slike 2.15 koja predstavlja raspodelu naprezanja u sistemu sa bimetalnim Cu/Ag-Ni kontaktom pri proticanju struje od 30 A. U ovom slučaju maksimalno ekvivalentno naprezanje je reda 650 MPa i prelazi granicu plastičnosti bakra, tako da se u postupku definisanja prekidačkih sklopova mora obratiti pažnja na ovo ograničenje.

Sa aspekta određivanja pouzdanog rada električnih kontakata od značaja su oblasti i vrednost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja u njima i za prethodno navedeni sistem one se mogu uočiti na osnovu slike 2.16. Lokalizacija maksimalne vrednosti ekvivalentnog naprezanja je na ivici glave kontakta uz noseću strukturu u pravcu maksimalne gustine struje i iznosi 220 MPa. Kao i kod masivnih kontakata simulacije ukazuju da je ovo mesto maksimalnog ekvivalentnog naprezanja za ceo opseg razmatranih struja.

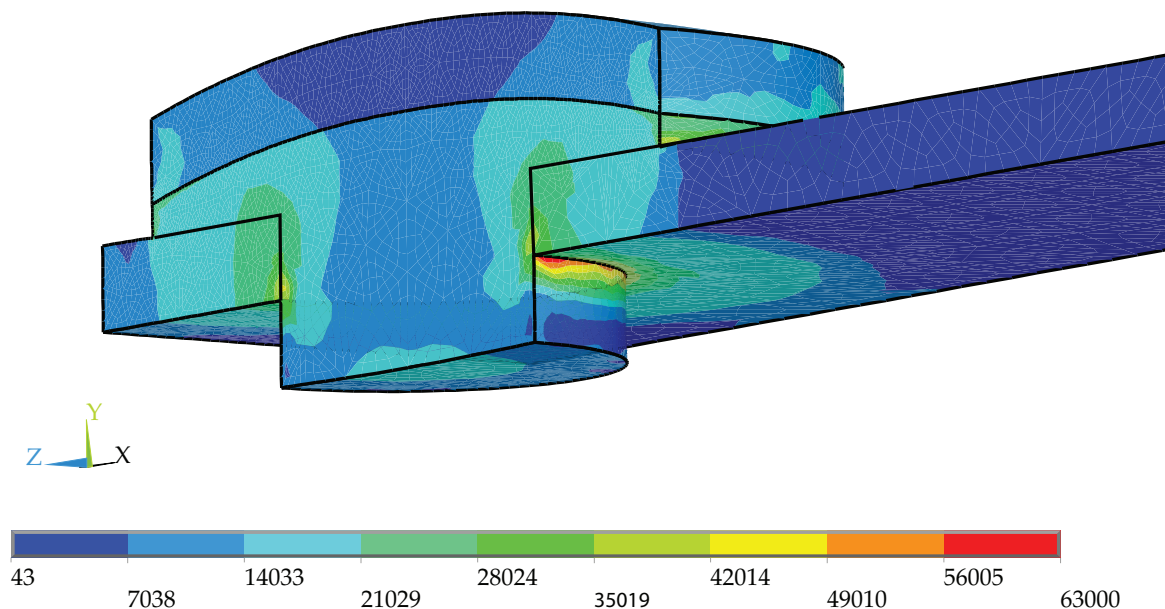


Slika 2.15: Raspodela ekvivalentnog napreznja u sistemu sa bimetalnim Cu/Ag-Ni kontaktom pri proticanju struje od 30 A.



Slika 2.16: Raspodela ekvivalentnog napreznja u bimetalnom Cu/Ag-Ni kontaktu pri proticanju struje od 30 A.

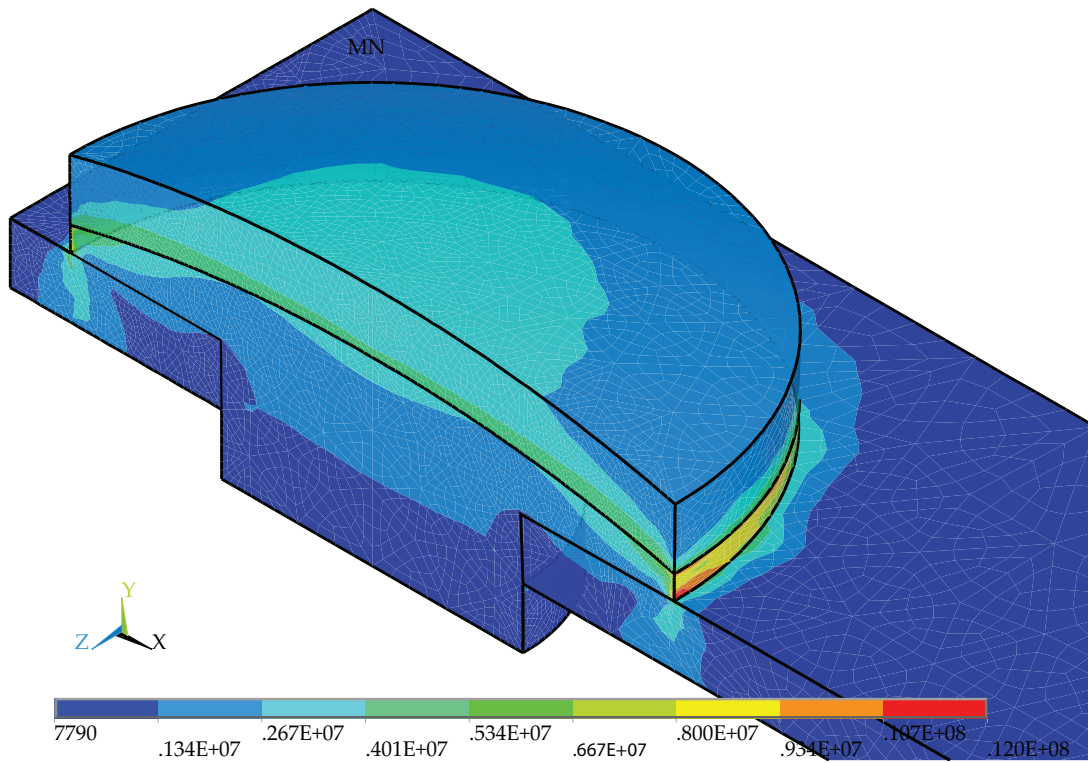
Sa druge strane, u sistemima kod kojih postoji dvostruko ograničenje slobode kretanja, oblast maksimalnog ekvivalentnog naprezanja zavisi od vrednosti primenjene struje, što je prikazano na slikama 2.17 i 2.18 koje predstavljaju sistem sa bimetalnim Cu/Ag–Cu kontaktom pri proticanju struje od 1 A i 30 A.



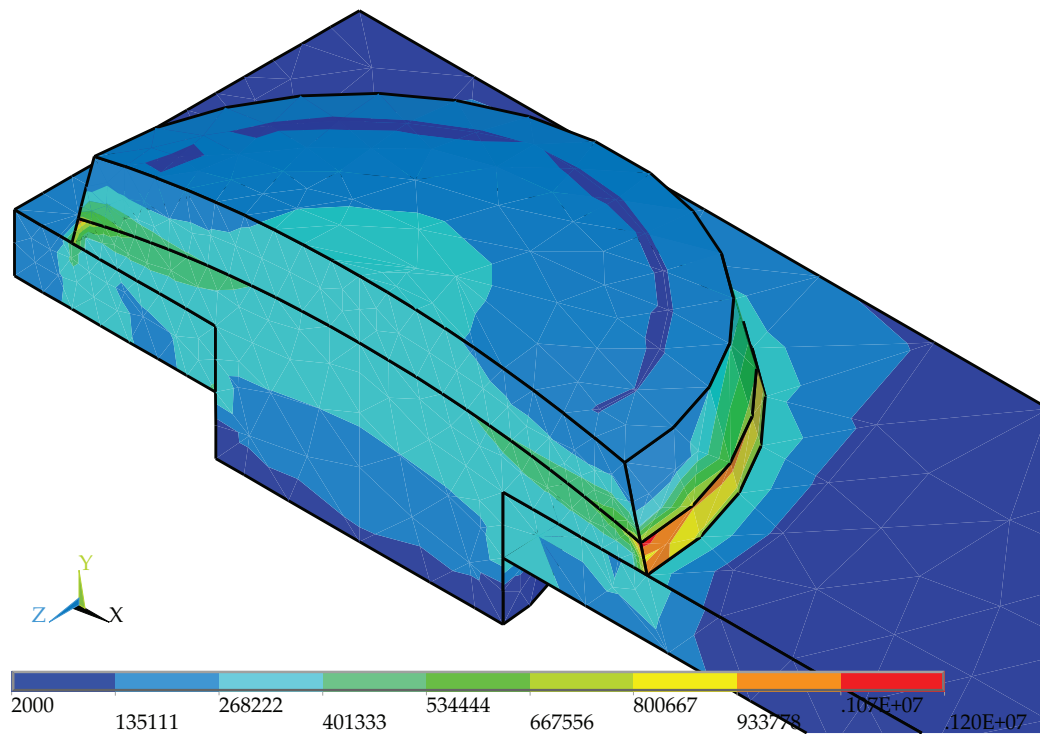
Slika 2.17: Raspodela ekvivalentnog naprezanja u bimetalnom Cu/Ag–Cu kontaktu pri proticanju struje od 1 A.

Za manje vrednosti struje maksimalno ekvivalentno naprezanje je u stablu kontakta i prvenstveno je posledica delovanja kontaktnog pritiska na materijale sa različitim elastičnim osobinama, s obzirom da pri ovoj struji elektro–termičko širenje ne dolazi do izražaja. Pri višim vrednostima primenjene struje (na slici 2.18 je vrednost 30 A) efekti elektro–termičkog širenja doprinose da se mesto maksimalnog naprezanja javlja na ivici glave kontakta sa vrednošću od 12 MPa.

Kod bimetalnih kontakata od značaja je pojava koncentrisanja viših vrednosti ekvivalentnog naprezanja uz spoj tela i prevlake kontakta u delu izrađenom od bakra. Ovakva raspodela napregnutosti je posledica spoja materijala sa različitim parametrima elastičnosti i čvrstoće i može, pri dugotrajnoj eksploataciji kontakata, da dovede do odvajanja sloja prevlake i gubitka funkcionalnosti. Ovo je posebno značajno kod kontakata sa modifikovanom geometrijom (ugao nagiba glave 15°), s obzirom da je maksimalno ekvivalentno naprezanje za srednje i više vrednosti struje lokalizovano uz ivicu spoja tela i prevlake. Slika 2.19 predstavlja raspodelu ekvivalentnog naprezanja u sistemu sa bimetalnim Cu/Ag–Cu kontaktom čiji je ugao nagiba glave 15° pri proticanju struje od 10 A na osnovu koje je lako uočljiva oblast mogućeg strukturnog oštećenja. Za niže vrednosti struje mesto maksimalnog naprezanja je u stablu kontakta i nije od kritičnog značaja za njihov rad.



Slika 2.18: Raspodela ekvivalentnog napreznja u bimetalnom Cu/Ag–Cu kontaktu pri proticanju struje od 30 A.



Slika 2.19: Raspodela ekvivalentnog napreznja u sistemu sa bimetalnim Cu/Ag–Cu kontaktom čiji je ugao nagiba glave 15° pri proticanju stuje od 10 A i dvostrukom ograničenju slobode kretanja.

Glava 3

Optimizacija zakovičastih električnih kontakata

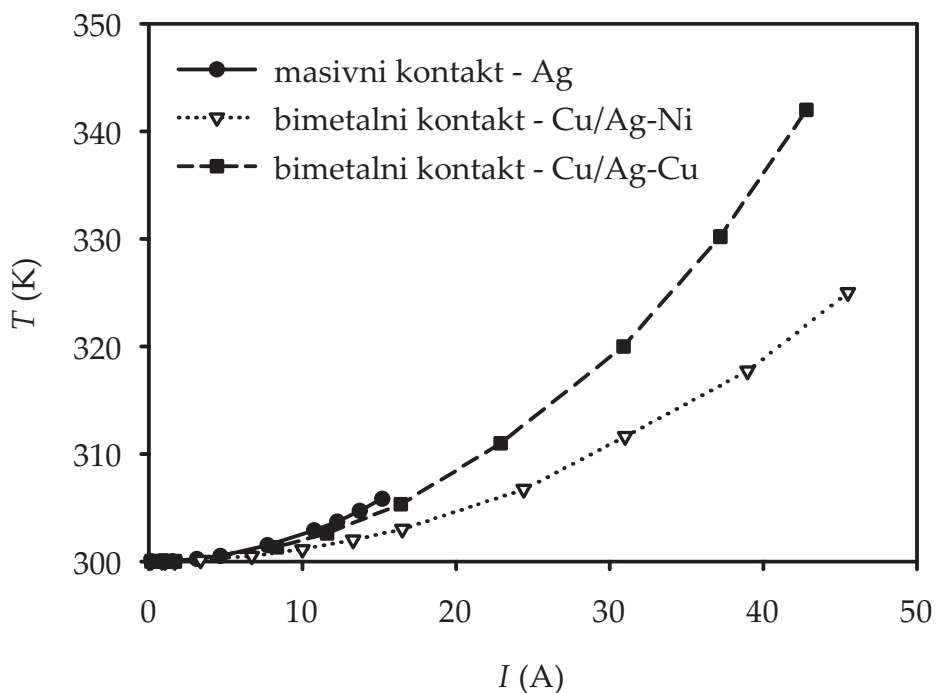
Za uspešno projektovanje i optimizaciju zakovičastih električnih kontakata sa ciljem zadovoljenja funkcionalnih, ekonomskih, ekoloških i parametara pouzdanosti neophodno je poznavanje zavisnosti temperature i maksimalnog ekvivalentnog naprezanja u kontaktima za različite vrednosti primenjene struje. Stoga su iz rezultata simulacije generisane navedene zavisnosti za više različitih kontaktnih materijala, određeni set vrednosti dimenzionih i geometrijskih parametara, kao i dva načina učvršćivanja noseće strukture.

3.1 Zavisnost temperature električnih kontakata od vrednosti primenjene struje

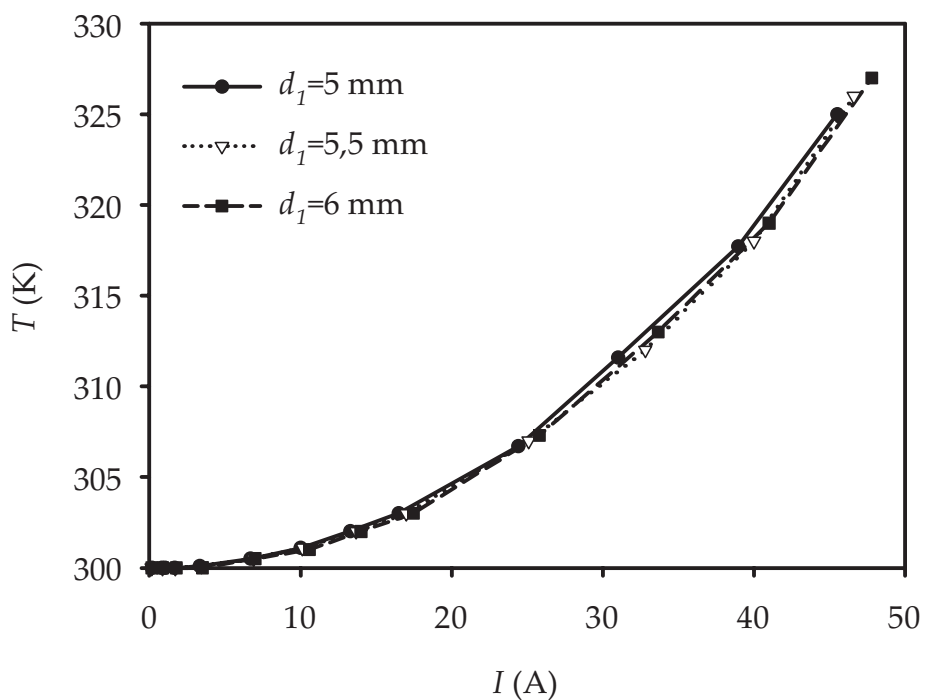
Kao što je navedeno u poglavlju 2.3 vrednost temperature u sistemima sa zakovičastim kontaktima zavisi od uslova opterećenja, električne i termičke provodnosti primenjenih materijala, kao i slobodnih površina i načina odvođenja toplote sa njih. Vrednosti temperature kontakata u zavisnosti od primenjene struje za masivni – Ag, bimetalni Cu/Ag–Ni i bimetalni Cu/Ag–Cu kontakt su date na slici 3.1. Razmatrane su osnovne projektovane dimenzije iz tabele 2.1, a ograničenje slobode kretanja kod masivnog i bimetalnog Cu/Ag–Ni kontakta je na jednoj kontaktnoj površini, dok je kod bimetalnog Cu/Ag–Cu kontakta dvostruko. Sa slike su uočljive značajno više temperature bimetalnih kontakata izrađenih od Cu/Ag–Cu u odnosu na Cu/Ag–Ni kontakte pri istim dimenzijama i primenjenim strujama. Ovo je uslovljeno dodatnim učvršćenjem noseće strukture sa donje strane, čime je smanjena površina sa koje se putem konvekcije odvodi toplota sa sistema.

Uticaj prečnika glave bimetalnih kontakata na njihove temperature za opseg primenjenih struja je razmatran za Ag–Cu kao materijal prevlake i rezultati su prikazani na slici 3.2 za sistem u kome je jednostruko ograničenje slobode kretanja i na slici 3.3 za sistem sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja. Uočljivo je da promena vrednosti prečnika glave kontakata ne utiče na promenu vrednosti temperature u okviru određenog sistema, ali je način učvršćivanja noseće strukture od značaja za konkretnu vrednost temperature.

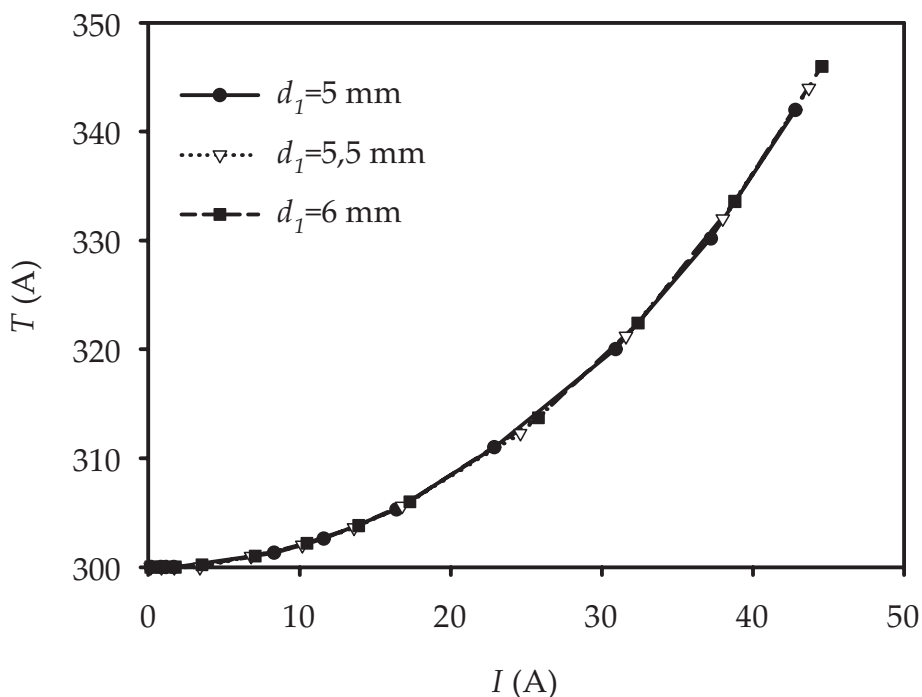
Izmenjeni ugao nagiba glave za definisani prečnik glave kontakata takođe ne unosi izmene u zavisnosti temperature od primenjene struje. Sa druge strane, način učvr-



Slika 3.1: Zavisnost temperature kontakata od primenjene struje.



Slika 3.2: Zavisnost temperature od primenjene struje kod bimetalnih Cu/Ag-Cu kontakata u sistemu sa jednostrukim ograničenjem slobode kretanja za tri različita prečnika kontaktne glave.



Slika 3.3: Zavisnost temperature od primenjene struje kod bimetalnih Cu/Ag–Cu kontakata u sistemu sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja za tri različita prečnika kontaktne glave.

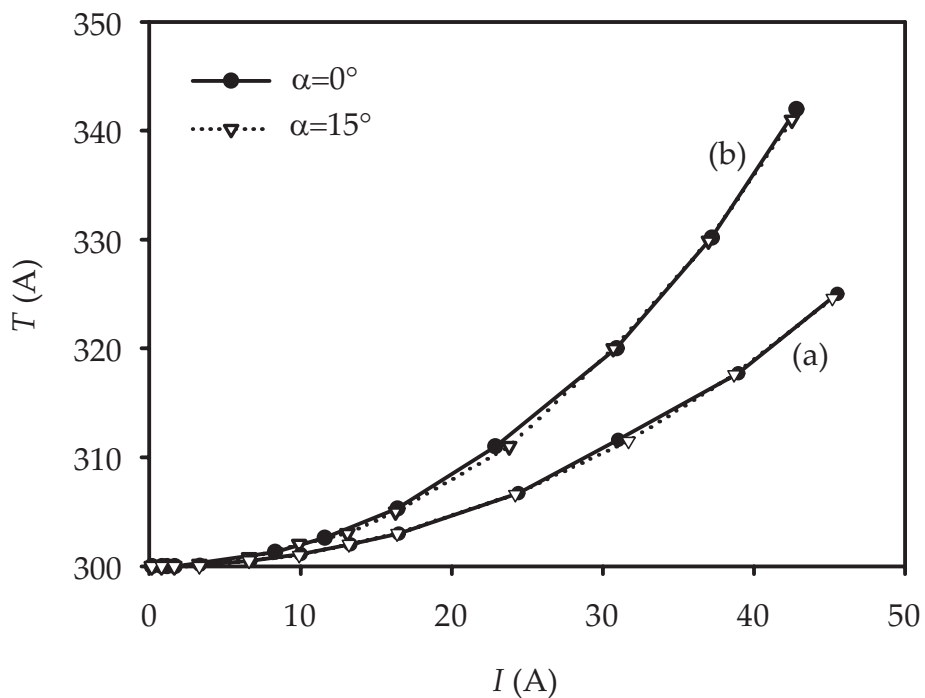
šćivanja noseće strukture ima presudnu ulogu u definisanju kvantitativnih vrednosti temperatura, kao što se uočava sa slike 3.4.

Kontakti jednakih geometrija izrađeni od materijala sličnih električnih i termičkih provodnih karakteristika pri istovetnim uslovima opterećenja imaju bliske temperature, kao što se može uočiti sa slike 3.5. Na ovoj slici su date zavisnosti temperature od jačine primenjene struje za bimetalne kontakte jednakih dimenzija izrađene od tri različita materijala prevlake, a koji funkcionišu u okviru istovetnih nosećih struktura (sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja).

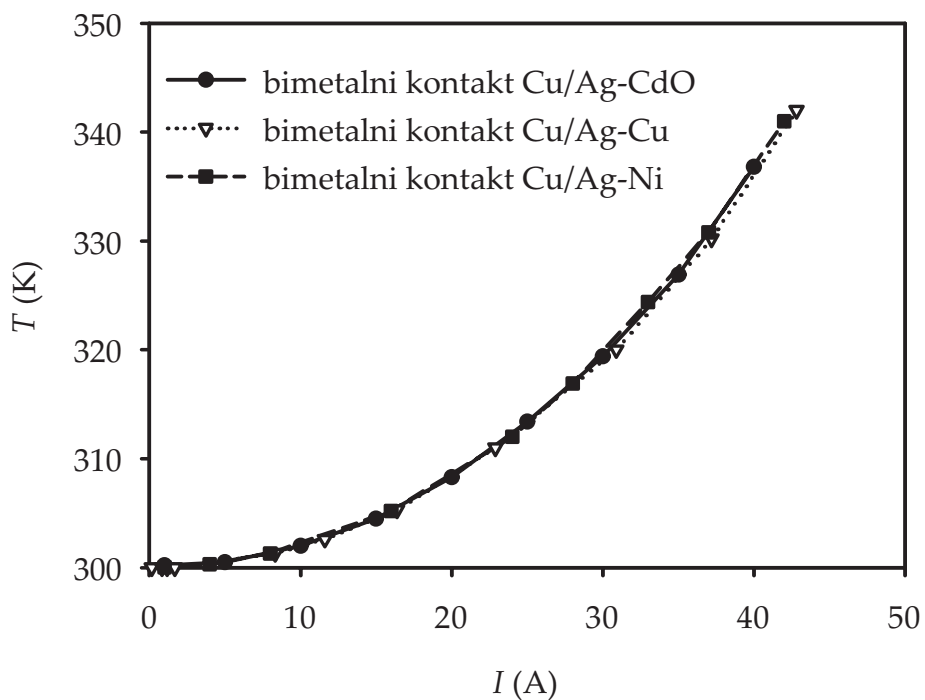
Na osnovu slika 3.1 – 3.5 uz poznavanje dozvoljenih nadtemperatura kontakata s obzirom na propisanu temperaturu okoline, mogu se definisati njihove nominalne vrednosti struja, a time i moguće primene kontakata. Dozvoljene nadtemperature kontakata su definisane odgovarajućim standardima i za posebne bakarne kontakte u vazduhu ona iznosi 50 K [33]. Dodatno se zaključuje da je za analiziranje primene određene vrste kontakata u termičkom smislu neophodno poznavanje načina njihove ugradnje u prekidačku komponentu. Prikazane zavisnosti omogućavaju i optimizaciju sa ekološkog aspekta izbora kontaktnog materijala imajući u vidu da daju poređenje primene alternativnih legura kao zamena za široko rasprostranjenu ali toksičnu leguru 90%Ag–10%CdO.

3.2 Zavisnost maksimalnog ekvivalentnog napreznja u električnim kontaktima od vrednosti primenjene struje

Ekvivalentno napreznje u kontaktima je rezultat mehaničkog dejstva sile kontaktiranja na glavu kontakta i generisanog napreznja usled termičkog širenja materijala pri



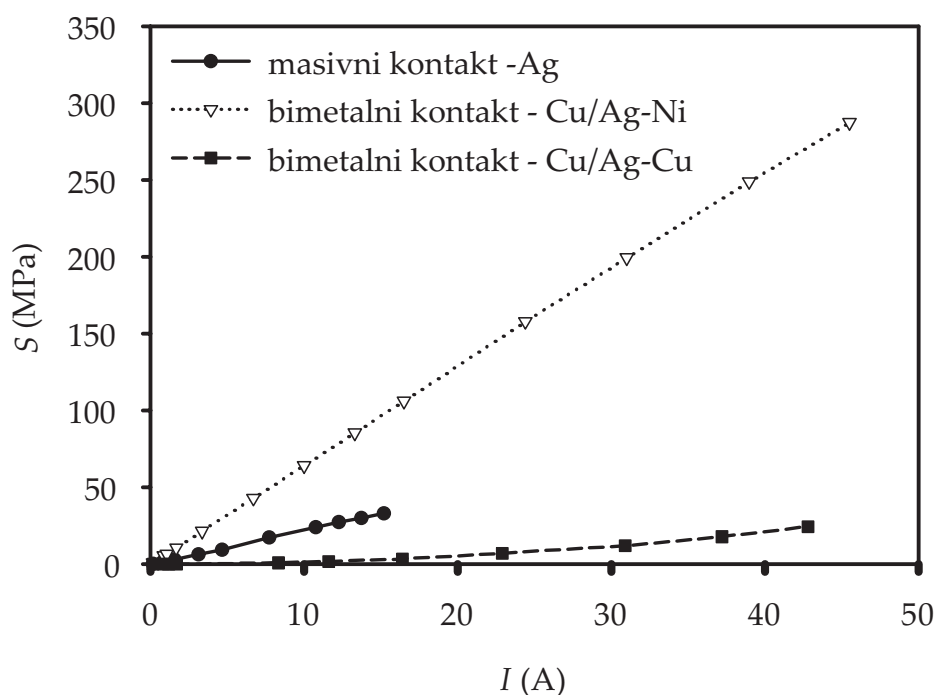
Slika 3.4: Zavisnost temperature od primenjene struje kod bimetalnih Cu/Ag-Cu kontakata za dva ugla nagiba kontaktne glave u sistemu sa (a) jednostrukim i (b) dvostrukim ograničenjem slobode kretanja.



Slika 3.5: Zavisnost temperature od primenjene struje kod bimetalnih kontakata u sistemu sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja za tri materijala prevlake.

proticanju struje. Mesto maksimalnog naprezanja u strukturi, kao i njegova vrednost, uslovljeni su izborom kontaktnih materijala, vrednošću primenjene struje i kontaktnog pritiska i ograničenjem slobode kretanja. Shodno razmatranjima datim u poglavlju 2.3, naprezanje u nosećoj strukturi za uslove rada masivnih kontakata (vrednosti sile kontaktiranja do 3 N) i bimetalnih kontakata kod kojih postoji dvostruko ograničenje slobode kretanja (postoji preraspodela sile kontaktiranja) nije od kritičnog uticaja pri konstrukciji prekidačkih sklopova. Kod sistema sa jednostrukim ograničenjem slobode kretanja maksimalno ekvivalentno naprezanje u nosećoj strukturi za visoke vrednosti primenjene struje prelazi granicu plastičnosti, tako da se ova činjenica mora imati u vidu pri izboru prekidačkog sklopa u okviru koga će funkcionisati. Bez obzira na realizaciju prekidačkog sklopa, zavisnost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja od primenjene struje u samim kontaktima od velikog je značaja za definisanje parametara njihovog pouzdanog rada.

Na slici 3.6 je prikazana zavisnost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja od primenjene struje za masivni – Ag, bimetalni Cu/Ag–Ni i bimetalni Cu/Ag–Cu kontakt. Dimenzije kontakata su osnovne iz tabele 2.1, a ograničenje slobode kretanja kod masivnog i bimetalnog Cu/Ag–Ni kontakta je jednostruko, dok je kod bimetalnog Cu/Ag–Cu kontakta dvostruko.

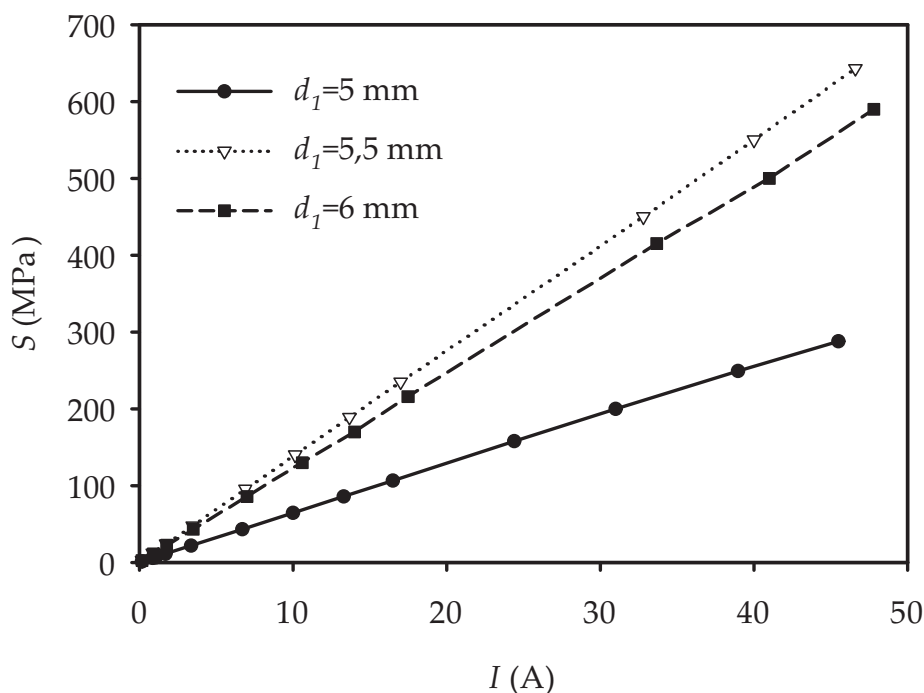


Slika 3.6: Zavisnost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja u kontaktima od primenjene struje.

Uočava se skoro linearna zavisnost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja od jačine struje kod masivnog i bimetalnog Cu/Ag–Ni kontakta koja je posledica direktne veze između vrednosti primenjenog kontaktnog pritiska i jačine struje. Naime, u ovakvim strukturama ekvivalentno naprezanje je u najvećoj meri određeno mehaničkim opterećenjem, dok elektro–termičko naprezanje ima efekat drugog reda. Kod struktura koje su sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja zavisnost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja u kontaktima od primenjene struje ima eksponencijalni karakter i značajno

niže vrednosti. U ovom slučaju, pored postojanja preraspodele sile kontaktiranja, pri višim primenjenim strujama dolazi do izražaja elektro-termičko naprezanje, a samim tim i promena oblasti pojave maksimalnog ekvivalentnog naprezanja, kao što je navedeno u potpoglavlju 2.3.2.

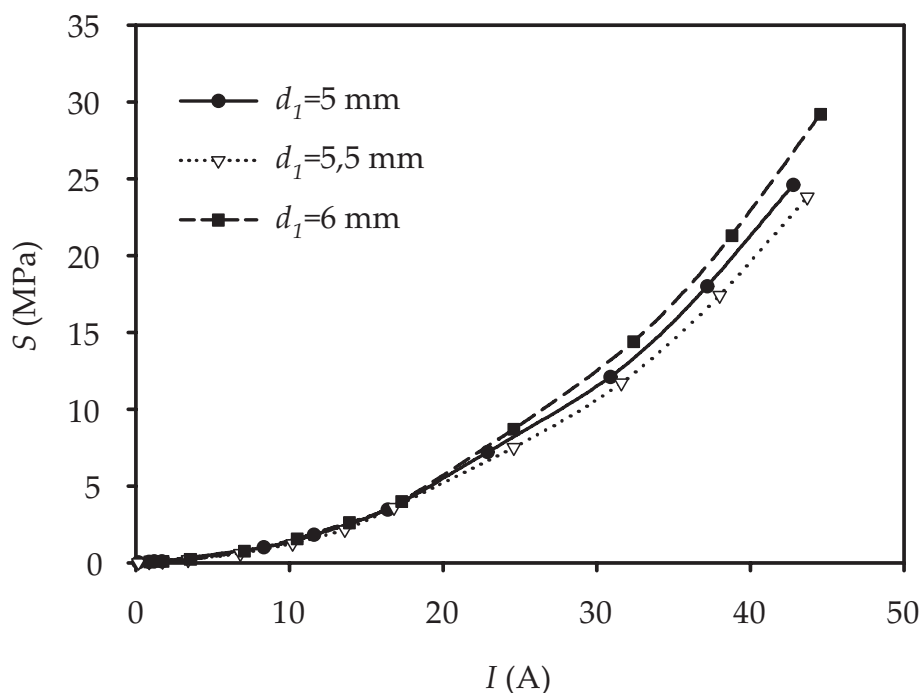
Uticao prečnika glave bimetalnih kontakata na maksimalno ekvivalentno naprezanje za opseg primenjenih struja je razmatran za Ag-Cu kao materijal prevlake i rezultati su prikazani na slici 3.7 za sistem u kome je jednostruko ograničenje slobode kretanja i na slici 3.8 za sistem sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja.



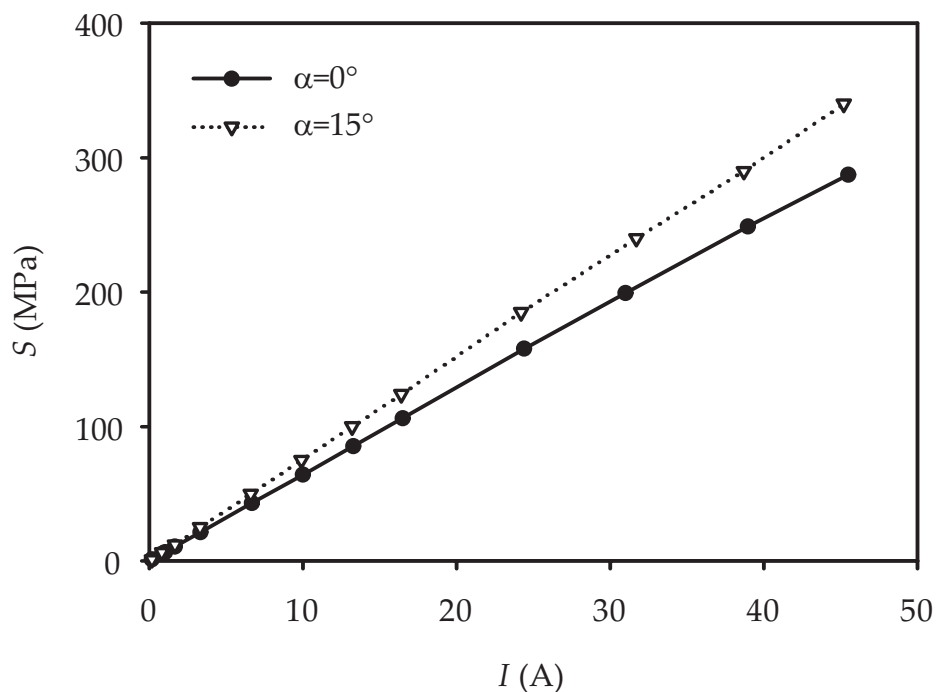
Slika 3.7: Zavisnost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja od primenjene struje kod bimetalnih Cu/Ag-Cu kontakata u sistemu sa jednostrukim ograničenjem slobode kretanja za tri različita prečnika kontaktne glave.

Kod prvog sistema postoji skoro linearna zavisnost maksimalnog naprezanja od jačine struje (slika 3.7) za sve razmatrane prečnike kontaktne glave. Međutim, usled postojanja bimetalne strukture, gde su u spoju dva materijala različitih mehaničkih, električnih i termičkih karakteristika, ne postoji uočljiva veza između prečnika glave kontakta i vrednosti maksimalnog ekvivalentnog naprezanja. U drugom sistemu (slika 3.8) vrednosti maksimalnog ekvivalentnog naprezanja za sva tri prečnika glave su bliske sa eksponencijalnom zavisnošću od primenjene struje, ali kao i kod prvog sistema nije moguće eksplicitno predvideti njihove vrednosti.

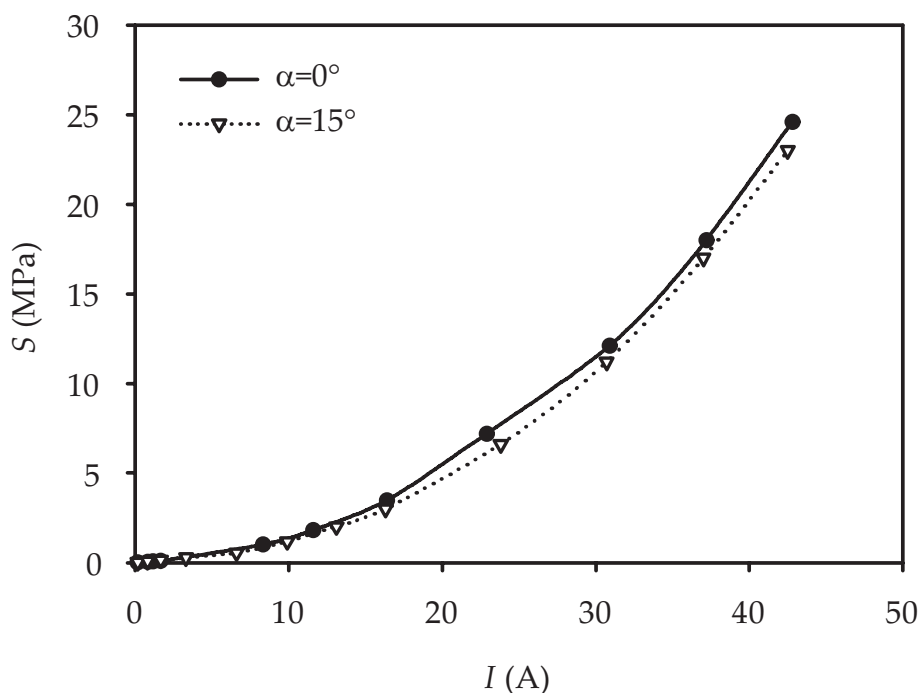
Zavisnost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja od primenjene struje za Cu/Ag-Cu bimetalne kontakte sa prečnikom glave 5 mm i uglom nagiba glave 15° , odnosno 0° je data na slikama 3.9 i 3.10. U sistemu kod koga postoji jednostruko ograničenje slobode kretanja (slika 3.9), zavisnost je linearna uz konstataciju da se izmenjenim uglom nagiba glave u odnosu na osnovnu realizaciju kontakata značajno povišava vrednost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja, što predstavlja nepoželjan efekat. U sistemima sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja (slika 3.10) vrednosti maksimalnog ekvivalentnog naprezanja su za ugao nagiba glave 15° nešto niže. Ovime se pri optimizaciji



Slika 3.8: Zavisnost maksimalnog ekvivalentnog napreznja od primenjene struje kod bimetalnih Cu/Ag–Cu kontakata u sistemu sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja za tri različita prečnika kontaktne glave.



Slika 3.9: Zavisnost maksimalnog ekvivalentnog napreznja od primenjene struje kod bimetalnih Cu/Ag–Cu kontakata u sistemu sa jednostrukim ograničenjem slobode kretanja za dva ugla nagiba glave.

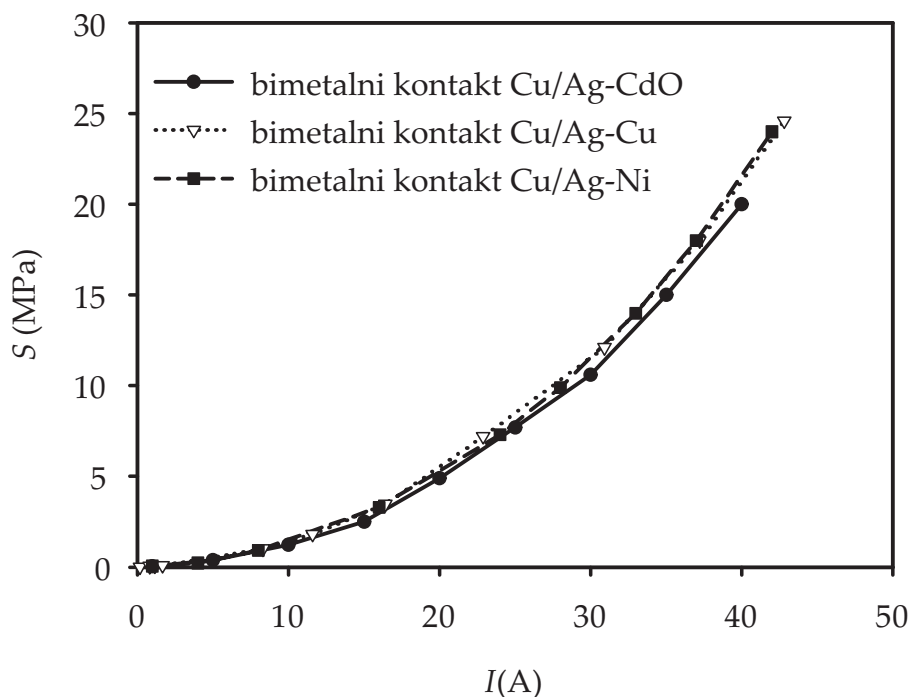


Slika 3.10: Zavisnost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja od primenjene struje kod bimetalnih Cu/Ag–Cu kontakata u sistemu sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja za dva ugla nagiba glave.

kontakata nameće potreba nalaženja kompromisa između manjeg utroška materijala i nešto niže vrednosti maksimalnog naprezanja koje obezbeđuje modifikovana geometrija naspram mogućnosti ubrzanog odlemljivanja kontaktnog sloja prevlake opisanog u potpoglavlju 2.3.2.

Slika 3.11 prikazuje zavisnost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja od primenjene struje kod bimetalnih kontakata u sistemu sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja sa materijalom prevlake kao parametrom. Njom se potvrđuje da kontakti izrađeni od materijala bliskih električnih i mehaničkih karakteristika imaju skoro identične navedene zavisnosti, što omogućava izbor najpogodnijeg materijala po pitanju ekološke podobnosti i ekonomske isplativosti.

Zavisnosti maksimalnog ekvivalentnog naprezanja od primenjene struje za različite realizacije kontakata omogućavaju određivanje njihovog životnog veka usled zamora materijala. Naime, na osnovu takozvanih S–N krivih opisanih u poglavlju 1.1 definiše se maksimalan broj kontaktiranja za koji je obezbeđen pouzdan rad prekidačkog sklopa pri zadatoj vrednosti naprezanja. Takođe, na osnovu ovih krivih se može odrediti vrednost naprezanja pri kojoj kontakti mogu otkazati nakon primene specificiranog broja ciklusa kontaktiranja, a na osnovu nje eksploatacioni uslovi koji uključuju primenjenu struju i silu kontaktiranja, kao i način realizacije prekidačkog sklopa.



Slika 3.11: Zavisnost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja od primenjene struje kod bimetalnih kontakata u sistemu sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja za tri materijala prevlake.

3.3 Rezultati optimizacije zakovičastih električnih kontakata

Za osnovnu geometriju zakovičastih kontakata usvojenu u postupku projektovanja i zadate parametre noseće strukture izvršena je optimizacija u pogledu izbora kontaktnog materijala, vrednosti prečnika i ugla nagiba glave kontakta i definisanja nominalne struje. Pri tome su razmatrani funkcionalni, ekonomski, ekološki i aspekti pouzdanosti. Na osnovu rezultata opisanih u prethodna dva potpoglavlja izdvajaju se tri sistema kontakt – noseća struktura koje treba zasebno razmatrati. To su sistem sa masivnim Ag kontaktom, sistem sa bimetalnim kontaktom i jednostrukim ograničenjem slobode kretanja i sistem sa bimetalnim kontaktom i dvostrukim ograničenjem slobode kretanja.

3.3.1 Masivni Ag kontakti

Za sistem sa masivnim Ag kontaktom izvršena je verifikacija funkcionalnosti projektovanog dizajna pri specificiranim radnim uslovima, kao i procena parametara pouzdanosti. Za kontaktni materijal je uzeto srebro čistoće 99,99% koje predstavlja najbolji materijal za izradu kontakata u električnom i termičkom pogledu, geometrija i dimenzije su usvojene na osnovu zahteva tržišta, a sila kontaktiranja definisana praktičnom realizacijom prekidačkog sklopa. Zavisnost temperature kontakata od primenjene struje daje mogućnost utvrđivanja njihove funkcionalnosti pri nominalnoj vrednosti struje. Na osnovu slike 3.1 je evidentno da je ova funkcionalnost po pitanju nadtemperature kontakata za nominalnu vrednost struje od 15 A zadovoljena s obzirom da je njena vrednost oko 5 K, dok standardima dozvoljena vrednost iznosi 50 K. Sa slike 3.6 se za maksimalno

ekvivalentno naprezanje pri nominalnoj struji dobija 33 MPa. Za ovu vrednost naprezanja se određuje životni vek usled zamora materijala na osnovu S–N krive za srebro (slika 1.5) i iznosi preko 10^6 ciklusa kontaktiranja.

Noseća struktura je od bakra koji, zavisno od primenjenog načina obrade i postupka očvršćavanja, ima vrednost naprezanja na granici plastičnosti 55–330 MPa i ne poseduje efekat zaostale napregnutosti usled postupka zakivanja. Imajući u vidu da je za nominalnu struju vrednost maksimalne napregnutosti u pločici oko 150 MPa i savijanje pločice svega 120 μm , realizacija noseće strukture ne predstavlja kritičan parametar u postupku projektovanja i optimizacije masivnih električnih kontakata.

3.3.2 Bimetalni kontakti u sistemu sa jednostrukim ograničenjem slobode kretanja

Projektovanje bimetalnih kontakata je urađeno sa ciljem primene u uređajima kod kojih nominalne vrednosti struje dostižu 40 A. Na osnovu slike 3.1, gde je prikazana zavisnost temperature Cu/Ag–Ni kontakta u sistemu sa jednostrukim ograničenjem slobode kretanja od primenjene struje, uočava se da i za vrednosti struje iznad nominalnih 40 A nadtemperatura kontakata ne prelazi propisanih 50 K. Iste vrednosti nadtemperature postoje i za izmenjene prečnike kontaktne glave kod Cu/Ag–Cu kontakta (slika 3.2), kao i za izmenjen ugao nagiba glave kontakta (slika 3.4). Ovom činjenicom se izbor optimalnog dizajna preusmerava sa termičkih, na električne odnosno mehaničke parametre.

Povećanjem prečnika glave kontakata obezbeđuje se smanjenje kontaktne otpornosti, ali se, kako pokazuje slika 3.7, povećava vrednost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja i to čak dvostruko za vrednost nominalne struje. S obzirom da je mesto maksimalnog ekvivalentnog naprezanja u delu kontakata izrađenom od bakra (videti 2.3.2), na osnovu S–N zavisnosti sa slike 1.5 za vrednost maksimalnog ekvivalentnog naprezanja koje odgovara nominalnoj struji (255 MPa) i prečnik glave od 5 mm broj kontaktiranja koji obezbeđuje pouzdan rad je reda 10^4 . Povećanjem prečnika glave kontakata ovaj broj se rapidno smanjuje tako da je za ostvarenje željenog životnog veka prekidačkog sklopa neophodno usvojiti prečnik glave od 5 mm. Dodatno, ukoliko se želi dugotrajnija funkcionalnost kontakata treba smanjiti vrednost nominalne struje i to za broj kontaktiranja reda 10^5 na 15 A i za 10^6 kontaktiranja na 11 A.

Analogna razmatranja važe za kontakte sa izmenjenom geometrijom, tako što je razmatran ugao nagiba glave od 15° . Time se smanjuje utrošak materijala prevlake i povišava vrednost pritiska kontaktiranja ali i povećava maksimalno ekvivalentno naprezanje kao što ukazuje slika 3.9. Ovo povećanje naprezanja skraćuje vek pouzdanog rada kontakata za nominalne vrednosti struje ispod prihvatljivih granica. Međutim, adekvatnim smanjenjem vrednosti nominalne struje na 15 A omogućava se realizacija prekidačkih sklopova sa ovakvim kontaktima koji obezbeđuju pouzdan rad za 80000 ciklusa kontaktiranja s obzirom da lokalizacija maksimalnog naprezanja ne predstavlja kritičan parametar (videti 2.3.2).

Kod sistema gde je sloboda kretanja ograničena jednom kontaktnom površinom potrebno je razmatrati i naprezanje u nosećoj strukturi. Na osnovu izraza (1.3) za pločicu od bakra razmatranih dimenzija (15 mm \times 6 mm \times 0,5 mm) i definisane sile kontaktiranja od 0,36 N/A dobija se maksimalna dozvoljena vrednost struje od 15 A i savijanje na slobodnom kraju od 0,5 mm. Ovo ograničenje je u skladu sa navedenim vrednostima nominalne struje koja obezbeđuje dugotrajan pouzdan rad kontakata sa prečnikom glave od 5 mm i uglom nagiba glave od 15° . Sa druge strane, ukoliko je neophodna realizacija

prekidačkog sklopa za nominalnih 40 A, a za broj ciklusa kontaktiranja do 10^4 , mora se upotrebiti bimetalni kontakt osnovne geometrije ($d_1=5$ mm, $\alpha = 0^\circ$) i noseća struktura nešto izmenjenih dimenzija (15 mm \times 6 mm \times 0,8 mm).

3.3.3 Bimetalni kontakti u sistemu sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja

Prekidački sklopovi u kojima je sloboda kretanja dvostruko ograničena pokazuju više vrednosti temperature od sklopova sa jednostrukim ograničenjem pri istovetnim primenjenim električnim i mehaničkim opterećenjima. Razlika je uslovljena izmenjenim termičkim uslovima funkcionisanja i sa slike 3.1 se uočava da za bimetalni Cu/Ag–Cu kontakt i nominalnu struju od 40 A ova razlika iznosi čak 17 K. Ipak, i ova uvećana vrednost nadtemperature kontakata ne prelazi propisanih 50 K. Izmene vrednosti prečnika glave i ugla nagiba glave ne unose promene u zavisnost temperature od primenjene struje, što je ilustrovano na slikama 3.3 i 3.4.

Izmenjeni granični uslovi mehaničkog opterećenja usled preraspodele dejstva sile kontaktiranja utiču na smanjenje vrednosti maksimalnog ekvivalentnog naprezanja na 20 MPa (slika 3.6), čime je obezbeđen pouzdan rad kontakata za više od 10^6 ciklusa kontaktiranja. Pri tome, različitim vrednostima prečnika glave kontakta odgovaraju bliske vrednosti maksimalnog ekvivalentnog naprezanja sa maksimalnom razlikom pri nominalnoj struji od 13%, što pokazuje slika 3.8. Nepostojanje eksplicitne zavisnosti između prečnika glave kontakta i vrednosti maksimalnog ekvivalentnog naprezanja nameće potrebu traženja kompromisa između ekonomskih parametara (količine utrošenog materijala) i vrednosti otpornosti kontaktiranja.

Kontakti sa uglom nagiba glave od 15° pokazuju nešto niže vrednosti maksimalnog ekvivalentnog naprezanja za predviđene uslove električnog napajanja (slika 3.10). Time je realizacija prekidačkih sklopova sa ovakvim tipom kontakata optimalna, s obzirom da obezbeđuje manji utrošak materijala, više vrednosti kontaktnog pritiska i niže vrednosti maksimalnog ekvivalentnog naprezanja. Jedini moguć nedostatak ovakve realizacije je lokalizacija maksimalnog naprezanja pri višim strujama uz spoj tela kontakta i prevlake, što u određenim eksploatacionim uslovima može da dovede do skraćenja životnog veka usled odlemljivanja prevlake.

Noseća struktura u sistemima sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja ne trpi značajno naprezanje, tako da je njena projektovana geometrija u potpunosti funkcionalna za vrednosti struje do nominalne.

Uzimajući u obzir ekološki aspekt optimizacije kontakata, njihova realizacija sa legurama Ag–Ni i Ag–Cu kao materijalima prevlake umesto široko rasprostranjene, ali toksične legure Ag–CdO je u potpunosti opravdana. Naime, na osnovu slika 3.5 i 3.11 zaključuje se da je funkcionalnost kontakata pri zadatim eksploatacionim uslovima za sva tri ispitivana materijala istovetna, a time i njihova međusobna supstitucija opravdana.

Deo II

Termički prekidači

Glava 4

Osnovne postavke projektovanja i optimizacije termičkih prekidača

Termički prekidači kao elementi poslednje zaštite u električnim kolima, treba da obezbede brz i trajan prekid strujnog kola u uslovima kada se u uređajima generiše toplota iznad propisane vrednosti. Time se električni uređaji štite od pregrevanja i eventualnog samozapaljivanja. Termički prekidači menjaju stanje iz zatvorenog u otvoreno bez obzira na način nastanka prekomernog zagrevanja (usled povišene temperature okoline i/ili usled generisane *Joule*-ove toplote pri proticanju struje više vrednosti od nominalne).

Njihova klasifikacija se vrši na osnovu konstrukcije i vrednosti temperaturnih i električnih parametara funkcionisanja [14,16,88]. Konstrukcija prekidača definisana je načinom prekidanja strujnog kola, oblikom i dimenzijama izvoda preko kojih se spajaju sa električnim uređajem čija se zaštita očekuje i tipom i izgledom kućišta. Temperaturni parametri funkcionisanja termičkih prekidača su [14]:

- *Nominalna radna temperatura* T_F – temperatura na kojoj termički prekidač prelazi u neprovodno stanje pri čemu je jedino opterećenje struja detektovanja provodnosti;
- *Temperatura držanja* T_H – maksimalna temperatura okoline na kojoj termoprekidač može biti držan dok provodi nominalnu vrednost struje tokom 168 sati, a da pri tom ne dođe do prekida strujnog kola;
- *Maksimalna temperatura* T_M – maksimalna temperatura na kojoj termički prekidač koji je u neprovodnom stanju može biti držan tokom 10 min, a da njegove mehaničke i električne karakteristike ne budu narušene;
- *Temperatura prekidanja* – temperatura na kojoj se prekida veza između provodnih elemenata unutar termičkog prekidača,

dok u osnovne električne parametre spadaju [15]:

- *Nominalna struja* – maksimalna struja koju prekidač može da provodi određeno vreme na temperaturi držanja, a da nominalna radna temperatura ne promeni vrednost;
- *Nominalni napon* – maksimalni napon koji se sme primeniti u kolu u kome termički prekidač funkcioniše;
- *Struja prekidanja* – vrednost struje koju termički prekidač može pouzdano da prekinе pri nominalnom naponu;

- *Dozvoljena struja preopterećenja* – vrednost povorke jednosmernih strujnih impulsa koju termički prekidač može da provodi, a da se njegove karakteristike ne naruše.

Postupci projektovanja i optimizacije treba da obezbede realizaciju termičkih prekidača koji poseduju preciznu i vremenski nepromenljivu temperaturu prekidanja, visoku osetljivost na promenu temperature okoline, veoma nisku i stabilnu unutrašnju otpornost, kao i jasno definisanu osobinu neresetovanja. Zadovoljenje navedenih karakteristika se ostvaruje kroz adekvatan oblik i dimenzije sastavnih delova termoprekidača, kao i izbor materijala od kojih se oni izrađuju.

4.1 Parametri funkcionalnosti, kvaliteta i pouzdanosti termičkih prekidača

Funkcionalnost, kvalitet i pouzdanost termičkih prekidača se razmatraju na osnovu vrednosti i vremenske stabilnosti njihove radne temperature, vremena odziva, električne otpornosti provodnog i izolacionog dela i mehaničke čvrstoće pri raznovrsnim radnim uslovima. Kriterijume predstavljaju zadržavanje funkcionalnosti prekidača i vrednosti navedenih veličina u okviru specificiranih tolerancija. Svi parametri se uglavnom posmatraju sa termičkog, električnog i mehaničkog aspekta.

4.1.1 Temperaturni parametri

Osnovni parametar termičkih prekidača je *nominalna radna temperatura* i njene dozvoljene tolerancije su od -10 °C do $+0\text{ °C}$. Ove vrednosti se definišu za uslove u kojima se temperatura okoline menja specificiranom brzinom ($0,5\text{--}1\text{ °C/min}$), odnosno kada se u termoprekidaču uspostavlja potpuna termička ravnoteža. S obzirom da u radnim uslovima neophodnim za određivanje nominalne radne temperature ne postoje efekti *Joule*-ovog zagrevanja, vrednost ove temperature je za konstantnu vrednost viša od temperature prekidanja i prevashodno određena parametrima termičke provodnosti konstrukcionih elemenata prekidača.

Vreme odziva termičkih prekidača u uslovima kada se nalaze na sobnoj temperaturi i naglo izlože temperaturama iznad radne treba da je reda $5\text{--}60\text{ s}$ zavisno od tipa prekidača [89]. Ova vrednost se koristi za određivanje kvaliteta termičkih prekidača, ali se u realnim aplikacijama ne koristi kao specificirana vrednost. Naime, utvrđivanje vremena odziva se vrši unošenjem termičkih prekidača u silikonsko uljano kupatilo definisane temperature i merenjem vremena do prekida. Činjenica da se parametri prenosa toplote silikonskog ulja i vazduha (u kojima prekidači realno funkcionišu) znatno razlikuju, ukazuje da će vreme odziva prekidača u realnim uslovima biti znatno više od datih laboratorijskih vrednosti. Stoga procena realnih vrednosti vremena odziva za raznovrsne uslove funkcionisanja prekidača predstavlja kompleksan zadatak u fazi njihovog projektovanja i optimizacije. Pri tome, ova vrednost u mnogome zavisi od konstrukcije prekidača.

Pri dugotrajnom izlaganju ekstremnim radnim uslovima dolazi do degradacije karakteristika materijala od kojih su izrađeni sastavni elementi termičkih prekidača. Zbog toga se kao parametar pouzdanosti prekidača razmatra *stabilnost radne temperature u uslovima ubrzanog starenja*. Od prekidača se zahteva održavanje vrednosti nominalne radne temperature u okviru zadatih tolerancija nakon izlaganja temperaturama 20 °C

ispod nominalne vrednosti, a pri relativnoj vlažnosti vazduha od 45–85% u trajanju od 1000 sati [13]. Takođe, prekidači moraju da zadrže funkcionalnost u okviru specificiranih vrednosti pri izlaganju sredinama sa 90–95% vlažnosti i temperaturama 40 °C (za $T_F \leq 100$ °C), odnosno 65 °C ($T_F > 100$ °C) u trajanju od 500 sati [15]. Ovaj parametar je određen termičkim i higroskopskim karakteristikama kućišta, kao i konstrukcijom i kvalitetom termoosetljivog dela prekidača.

4.1.2 Električni parametri

Kvalitet termičkih prekidača u električnom smislu određen je električnom otpornošću kako provodnih, tako i izolacionih elemenata i dielektričnom čvrstoćom izolacionog materijala.

Unutrašnja otpornost termičkih prekidača predstavlja električnu otpornost njegovih provodnih elemenata i treba da je reda nekoliko mΩ.

Otpornost izolacije termičkog prekidača treba da bude reda 100 MΩ u uslovima kada se nakon otvaranja prekidača između jednog izvoda i kućišta primeni dvostruko veći napon od nominalnog u trajanju od 1 min.

Izdržljivost na naponsko preopterećenje zavisi od dielektrične čvrstoće izolacionog materijala unutar termičkog prekidača koja treba da onemogući stvaranje provodnog puta između izvoda prekidača pri visokim primenjenim naponima nakon njegovog otvaranja. Ova vrednost treba da je reda 1000 – 2000 V.

Otpornost na struju preopterećenja je parametar kojim se ispituje funkcionalnost prekidača nakon primene između njegovih izvoda povorke od 100 strujnih impulsa amplitude 15 puta veće od nominalne vrednosti sa trajanjem od 3 ms u razmaku od 10s.

Parametar koji istovremeno obuhvata i termički i električni domen predstavlja *porast temperature termičkih prekidača* usled Joule–ovog efekta. Ovim parametrom se definiše kvalitet prekidača u okviru specificiranog tipa i obično daje za struje do dvostruko više vrednosti od nominalne pri radu komponente na sobnoj temperaturi.

4.1.3 Mehanički parametri

Za mehaničku stabilnost termičkih prekidača od značaja predstavljaju *čvrstina kućišta*, *otpornost na savijanje i uvrtnanje izvoda* i *otpornost na sabijanje i istezanje izvoda*. Ove karakteristike su određene konstrukcijom termičkih prekidača i materijalom kućišta i izvoda.

Kućište termoprekidača mora da obezbedi adekvatnu zaštitu funkcionalnog dela prekidača pri dejstvu mehaničkih sila određenog intenziteta (do 100 N), kao i pri konstantnom dejstvu vibracija nižih vrednosti amplitude. Ovaj parametar ima poseban značaj u realizacijama kod kojih deo provodnog puta čini samo kućište, ali i u slučajevima gde se mehaničkim oštećenjem kućišta onemogućava prekidanje strujnog kola.

Termički prekidači treba da ostanu neoštećeni nakon savijanja izvoda do 90° na rastojanju 10 mm od tela prekidača i njihovog uvrtnja za 180°. Takođe, treba da zadrže potpunu funkcionalnost nakon primene određene sile sabijanja, kao i sile istezanja na izvode prekidača.

4.2 Određivanje geometrije i dimenzija termičkih prekidača

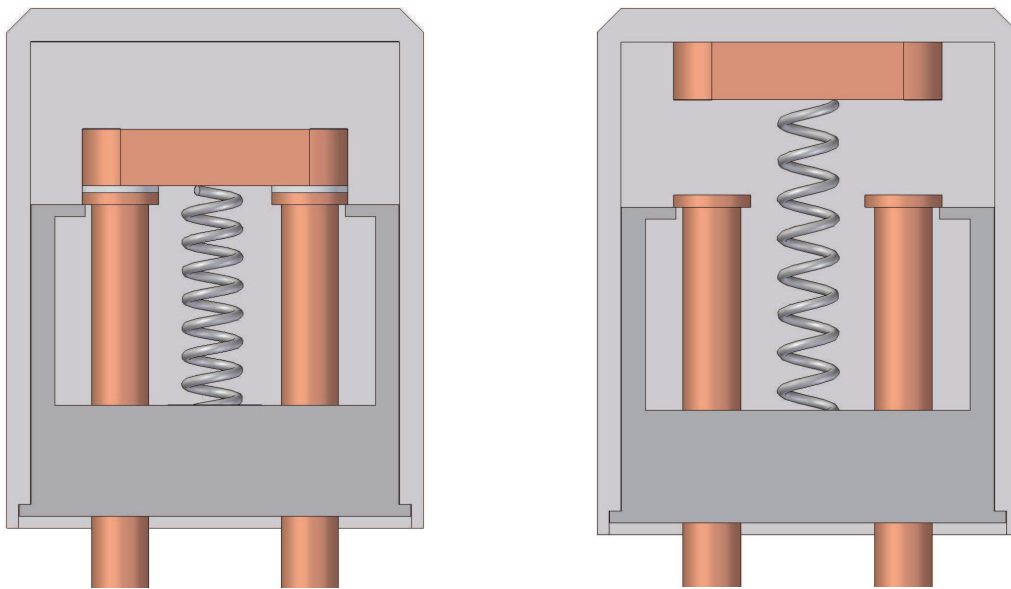
Termički prekidači nalaze primenu u veoma širokoj paleti uređaja od onih namenjenih kućnoj upotrebi, preko kancelarijskih do industrijskih mašina. Ovi uređaji se odlikuju različitim vrednostima napona i struje pri kojima rade, kao i svojim gabaritima. Usled toga, izgled termičkih prekidača može biti različit, dok se njihova osnovna podela vrši prema konstrukciji, nominalnoj radnoj temperaturi i nominalnom naponu i struji. Osnovne sastavne delove prekidača čine izvodi i provodna traka koji su hermetički zatvoreni u odgovarajuće kućište. Na osnovu konstrukcije termički prekidači se razlikuju po realizaciji provodne trake i načinu njenog spajanja sa izvodima, odnosno načinu prekidanja strujnog kola, po obliku i dimenzijama izvoda, kao i tipu kućišta.

Prema načinu prekidanja strujnog kola termički prekidači mogu biti sa samosakupljajućim materijalom ili sa oprugom. Kod prvih deo električnog provodnog puta između izvoda, odnosno provodnu traku, čini termoosetljivi materijal koji je prekriven slojem specijalnog jedinjenja na bazi kalofonijuma. Kada se dostigne definisana temperatura termoosetljivi materijal se topi, provodna traka se skuplja i usled dejstva površinskog napona specijalnog jedinjenja oblikuje u dve sfere na krajevima izvoda, čime se provodni put trajno prekida. Kod realizacija sa oprugom izvodi i provodna traka termoprekidača se izrađuju od standardnih provodnih materijala, a spojeni su termoosetljivim materijalom putem lemljenja. Kada na određenoj temperaturi dođe do topljenja lemnih spojeva, opruga koja je smeštena unutar kućišta potiskuje provodnu traku i raskida provodni put između izvoda.

Po obliku i dimenzijama izvoda termički prekidači se klasifikuju kao aksijalni, radijalni i trakasti [16], dok kućište može da bude metalno, plastično ili keramičko. U svim realizacijama izvodi su za kućište učvršćeni posebnim epoksidnim smolama kojima je ujedno obezbeđena hermetička zaptivenost termoprekidača. U unutrašnjosti kućišta je obično vazduh, ali se u posebnim slučajevima koji zahtevaju visoku dielektričnu čvrstoću izolacionog materijala može naći i odgovarajući izolacioni fluid.

Postupak projektovanja i optimizacije termičkih prekidača po pitanju geometrije i dimenzija obuhvata izbor odgovarajuće konstrukcije koja prvenstveno zavisi od željenog mesta ugradnje i dimenzionisanje sastavnih elemenata na osnovu nominalne vrednosti struje. U uslovima gde dimenzije prekidača ne predstavljaju kritičan parametar najčešće se primenjuje konstrukcija sa oprugom. Kod ovakve realizacije struja ne protiče direktno kroz termoosetljivi materijal tako da je unutrašnja otpornost izuzetno mala, dok je vrednost nominalne radne temperature stabilna u dugom vremenskom periodu. Takođe, omogućena je visoka vrednost struje preopterećenja pri mnogobrojnim ciklusima uključenja uređaja. Termički prekidači sa oprugom se izrađuju u dva tipa. Jedan je sa aksijalnim izvodima i metalnim kućištem koje ujedno predstavlja i deo provodnog puta, dok je drugi tip sa radijalnim izvodima i plastičnim ili keramičkim kućištem. Plastično kućište obezbeđuje izolaciju termoosetljivog dela prekidača u električnom smislu, zadovoljavajuću provodnost u termičkom smislu i mehaničku čvrstinu i pri malim dimenzijama. Stoga termički prekidači radijalnog tipa konstrukciono izvedeni sa oprugom u plastičnom kućištu (takozvanog S tipa) nalaze široku primenu i njihov poprečni presek pre i nakon prekidanja strujnog kola je prikazan na slici 4.1, dok su osnovni konstrukcioni elementi naznačeni na slici 4.2.

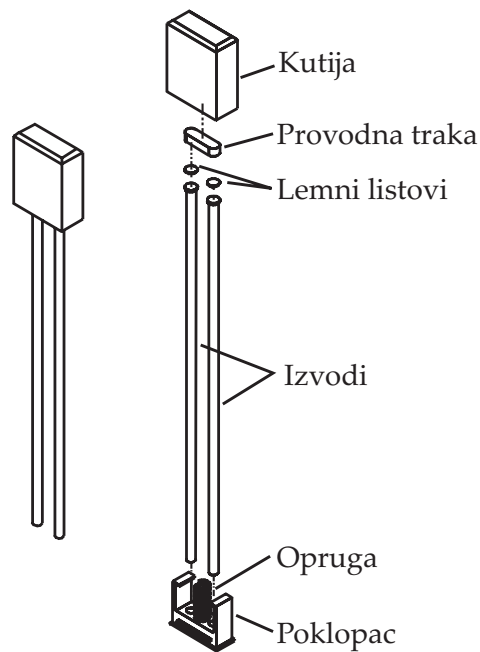
Provodni most prekidača čine izvodi formirani od dve provodne žice koje su na jednom kraju oblikovane u odgovarajuće kontaktne glave i pomoću termoosetljivog



(a)

(b)

Slika 4.1: Poprečni presek termičkog prekidača S tipa pre (a) i nakon (b) otvaranja.



Slika 4.2: Osnovni konstrukcioni elementi termičkog prekidača S tipa.

materijala u vidu lemnih listova zalemljene za provodnu traku. Izvodi su za poklopac kućišta učvršćeni epoksidnom smolom u položaju koji obezbeđuje da opruga koja naleže na provodnu traku bude u sabijenom stanju. Dimenzije elemenata provodnog mosta, kućišta i opruge koje su od interesa pri projektovanju termičkih prekidača i specificiranju njihovih karakteristika navedene su u tabeli 4.1.

| Element | Materijal | Karakteristična dimenzija |
|----------------|--------------------------|---------------------------|
| Izvod | Provodni materijal | Dužina |
| | | Prečnik |
| | | Prečnik kontaktne glave |
| | | Debljina kontaktne glave |
| | | Dužina izvoda van kućišta |
| Provodna traka | Provodni materijal | Dužina |
| | | Širina |
| | | Debljina |
| Lemni list | Termoosetljivi materijal | Prečnik |
| | | Debljina |
| Kućište | Samogasiva plastika | Visina |
| | | Širina |
| | | Debljina |
| | | Visina poklopca |
| | | Debljina zidova |
| Opruga | Čelik | Prečnik |
| | | Dužina |

Tabela 4.1: Karakteristične dimenzije termičkih prekidača.

Prečnik izvoda određen je nominalnom vrednošću struje i usvojena vrednost treba da obezbedi nadtemperaturu prekidača usled *Joule*-ovih gubitaka u okviru granice od 10–20 K. U tabeli 4.2 su prikazane okvirne vrednosti prečnika izvoda koje se koriste za realizaciju termičkih prekidača određenih nominalnih struja pri nominalnom naponu od AC 250 V.

| Nominalna struja (A) | 1 | 2 | 3 | 5 | 12 | 20 |
|----------------------|------|------|-----|-----|-----|----|
| Prečnik izvoda (mm) | 0,53 | 0,55 | 0,6 | 0,7 | 1,2 | 2 |

Tabela 4.2: Prečnici izvoda termičkih prekidača S tipa u zavisnosti od nominalne vrednosti struje.

Kontaktna glava izvoda se oblikuje u vidu zakovice i predstavlja modifikaciju osnovne geometrije izvoda. Njenim formiranjem se postiže bolje naleganje izvoda na provodnu traku, a time i čvršća veza između delova provodnog mosta kada je u provodnom stanju. Istovremeno, kontaktnim glavama se obezbeđuje niža vrednost temperature na lemnim spojevima pri specificiranim nominalnim radnim uslovima usled smanjenih *Joule*-ovih gubitaka. Prečnik kontaktne glave je 0,2 – 0,4 mm veći od prečnika izvoda dok je njena debljina 0,25 mm.

Usvojena vrednost dužine izvoda izvan kućišta zavisi od željenog mesta ugradnje termičkih prekidača i lako je izmenljiva vrednost. Standardno se definišu kratki, srednji

i dugi izvodi sa vrednostima 35 mm, 50 mm i 65mm, respektivno. Dužina izvoda unutar kućišta je prilagođena dimenzijama i elastičnim osobinama opruge koja obezbeđuje funkcionalnost prekidača. Ona treba da je u maksimalno sabijenom stanju u normalnim radnim uslovima kako bi se obezbedilo brzo reagovanje prekidača pri ispunjenju uslova prekidanja strujnog kola. Shodno tome, projektovana dužina izvoda ima vrednost 40 – 72 mm.

Dimenzije provodne trake se usklađuju sa dimenzijama izvoda. U osnovnom dizajnu širina trake treba da se poklapa sa prečnikom kontaktne glave izvoda, debljina sa prečnikom izvoda, dok je dužina određena rastojanjem između izvoda i njihovim prečnicima. Sa druge strane, rastojanje između izvoda je uslovljeno dimenzijama primenjene opruge, termičkim osobinama materijala kućišta i željenom izdržljivošću na naponsko preopterećenje. Naime, nakon otvaranja prekidača, a pri primenjenim visokim vrednostima napona između izvoda, ne sme da dođe do pojave električnog proboja dielektrika (za slučaj vazduha električno polje ne sme da pređe vrednost od 3×10^6 V/m [90]).

Lemni listovi imaju prečnik određen kontaktnim glavama izvoda i debljinu 150 μ m.

Kod S tipa prekidača kućište je kvadratnog oblika čime je obezbeđena adekvatna razmena toplote između prekidača i okoline putem konvekcije. Sastoji se od kutije i poklopca. Poklopac je ujedno i nosač provodnog mosta, pri čemu se zalivanjem izvoda epoksidnom smolom obezbeđuje njegova mehanička čvrstina. U poklopac kućišta se smešta i opruga, dok se kutijom postiže zaptivenost unutrašnjosti prekidača. Oblikom kućišta se omogućava visoka osetljivost na promenu temperature okoline, dok njegove dimenzije treba da omoguće pouzdan rad termoprekidača uz što manje spoljašnje gabarite. U tom smislu treba obezbediti dovoljan prostor unutar kućišta iznad i oko provodnog mosta. Debljina zidova kućišta zavisi od upotrebljenog materijala i treba da predstavlja kompromis između dva međusobno suprotna uslova. Veća debljina je potrebna radi boljih mehaničkih karakteristika, a manja debljina u cilju postizanja kraćih vremena odziva. Standardizovane dimenzije kućišta koje ispunjavaju napred navedene uslove su 4 – 13,5 mm za visinu, 5 – 13 mm za širinu i 2 – 4,3 mm za debljinu. Pri tome, konkretne dimenzije su uslovljene dimenzijama provodnog mosta, a one u osnovi zavise od vrednosti nominalne struje.

Opruga se bira iz palete standardnih čeličnih opruga pri čemu se njene dimenzije usklađuju sa dimenzijama provodnog mosta.

4.3 Izbor materijala konstrukcionih elemenata termičkih prekidača

Izbor materijala za realizaciju konstrukcionih elemenata termičkih prekidača određen je njihovim električnim, termičkim i mehaničkim osobinama. Pri tome kod provodnog mosta prevashodni značaj imaju električne i termičke, kod kućišta termičke i mehaničke, a kod opruge mehaničke osobine materijala.

Elementi provodnog mosta (izvodi i provodna traka) standardno se izrađuju od bakra kao visokoprovodnog materijala kako u električnom, tako i u termičkom pogledu. Zaštita od procesa oksidacije kojoj je bakar podložan postiže se prevlačenjem slojem kalaja ili nikla u debljinama reda nekoliko μ m. Imajući u vidu da je bakar relativno mek materijal on zadovoljava potrebe lakog oblikovanja izvoda prekidača kako bi se omogućila njegova što efikasnija ugradnja.

Elementi su spojeni lemljenjem odgovarajućim termoosetljivim materijalom. Lemni

materijal (listovi) svojim osobinama definiše temperaturu prekidanja, odnosno nominalnu radnu temperaturu termoprekidača i predstavlja osnov njegovog funkcionisanja. U tu svrhu se koriste različite niskotopive legure dvokomponentnog ili višekomponentnog sastava. Ove legure imaju temperaturu topljenja ispod 250 °C i sastavljene su od kalaja, olova ili srebra i nekih niskotopivih elemenata poput bizmuta, indijuma, antimona i galijuma. Najčešće su to legure čije se temperature solidusa i likvidusa poklapaju (eutektičkog karaktera) ili je njihov raspon veoma uzan (do par °C). Izbor niskotopive legure je određen željenom temperaturom prekidanja, cenom i ekološkom podobnošću. U tabeli 4.3 su navedene neke od komercijalno dostupnih niskotopivih legura [17–19,91–95].

| | | | | | | |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
| Niskotopiva legura | SnPb | SnBi | SnIn | SnAg | SnSb | SnCu |
| | InBi | PbBi | InAg | InPb | InGa | BiCd |
| | SnPbBi | SnBiIn | SnPbIn | SnBiAg | SnPbAg | SnInGa |
| | PbBiIn | PbInAg | BiInCd | SnInCd | SnPbBiAg | SnPbBiIn |

Tabela 4.3: Najčešće korišćene niskotopive legure.

Različiti sastavi navedenih legura definišu i različite temperature topljenja, odnosno njihove karakteristike. Obično se željena temperatura prekidanja može postići upotrebom različitih legura, tako da aspekt ekonomske isplativosti predstavlja drugi kriterijum izbora. Elementi poput indijuma, galijuma i antimona imaju visoku cenu, te se legure sa visokim procentima ovih elemenata koriste za specifične namene. Sa druge strane, toksičnost olova i kadmijuma nameće potrebu njihovog uklanjanja iz procesa proizvodnje elektronskih komponenata, i shodno tome alternativne legure nalaze sve širu primenu.

S obzirom da se sastoje od visokoprovodnih elemenata, niskotopive legure imaju električnu provodnost koja zadovoljava potrebe lemnih spojeva. Njihove mikrostrukturne karakteristike, u zavisnosti od načina dobijanja, mogu da doprinose boljem kvašenju lemnih površina. Mehaničke osobine lemnih legura kod termičkih prekidča ne predstavljaju kritičan parametar.

Termički prekidčači sa oprugom i radijalnim izvodima se izrađuju sa keramičkim ili plastičnim kućištem. Oba tipa kućišta obezbeđuju električnu izolovanost funkcionalnog dela prekidčača. Iako keramički materijali imaju višu termičku provodnost, upotreba plastike omogućava manje spoljašnje dimenzije prekidčača za usvojene dimenzije provodnog mosta. Primenjena plastika treba da poseduje osobinu samogasivosti i dobru termičku provodnost, kako bi se obezbedilo kraće vreme odziva prekidčača. Termičke osobine plastike, između ostalog, određuju i za koliko se nominalna radna temperatura prekidčača razlikuje od temperature prekidanja, kao i vrednost maksimalne temperature prekidčača. Mehaničke osobine plastike treba da obezbede izdržljivost kućišta na mehaničke udare u uslovima povišene temperature. Takođe, vibracije niskih amplituda, koje su često prisutne pri radu uređaja čiju zaštitu termički prekidčači ostvaruju, ne smeju da dovedu do mehaničkog oštećenja kućišta ili narušavanja funkcionalnosti prekidčača. U električnom smislu, plastika treba da poseduje odgovarajuću otpornost kako bi se obezbedila zadovoljavajuća vrednost otpornosti izolacije, koja je definisana u potpoglavlju 4.1.2.

Materijal opruge je čelik čije mehaničke karakteristike omogućavaju izradu opruge zadatih dimenzija. S obzirom da se opruga koristi kao unapred definisan konstrukcioni element, proces projektovanja termičkih prekidčača obuhvata izbor odgovarajuće opruge iz standardima definisane liste.

Glava 5

Karakterizacija niskotopivih legura za primenu u termičkim prekidačima

Funkcionalnost termičkih prekidača se zasniva na termičkom odzivu niskotopivih legura koje čine lemnii spoj između provodnih elemenata. Niskotopive legure imaju temperature topljenja ispod 250 °C i najčešće su višekomponentnog sastava. Osnovni sastavni elementi su kalaj, olovo ili srebro, dok se dodatkom nekog od niskotopivih elemenata poput bizmuta, indijuma, antimona i galijuma postiže željena temperatura ili opseg temperatura topljenja. Osim u proizvodnji termičkih prekidača, ove legure nalaze primenu u tehnologiji izrade komponenata za površinsku montažu namenjenih ugradnji u uređaje čija se eksploatacija neće odvijati u visokotemperaturnim uslovima.

Sa aspekta primene u termičkim prekidačima neophodno je poznavanje termičkih karakteristika niskotopivih legura (prvenstveno zavisnost tačke topljenja od sastava), dok poznavanje mikrostrukturnih karakteristika legura (struktura i sastav zrna) daju osnov za njihovo bolje procesiranje.

5.1 Generisanje 3–D faznih dijagrama trokomponentnih sistema

Za razvoj višekomponentnih legura unapred definisanih karakteristika, specificiranje uslova njihovog fabrikovanja i prognozu ponašanja u eksploatacionim uslovima veliki značaj imaju fazni dijagrami (vizuelna prezentacija stanja materijala u funkciji sastava, temperature i pritiska). Određivanje faznih dijagrama višekomponentnih legura eksperimentalnim putem obuhvata različite tehnike poput diferencijalne termičke analize [91], difrakcije i fluorescencije X-zračenja [96], elektronske mikrosondne analize [97], sinhrotrone radijacije [98], tehnike difuzione sprege [99]. Navedene tehnike predstavljaju dugotrajan, skup i težak proces, zbog čega numeričko modeliranje, koje se bazira na minimalnom setu eksperimentalnih podataka, ima veliki značaj u kreiranju faznih dijagrama.

Legure se obično ne tope na jedinstvenoj temperaturi već u opsegu temperatura. Temperatura likvidusa predstavlja najvišu temperaturu na kojoj se legura određenog sastava nalazi u čvrstom stanju, dok temperatura solidusa predstavlja najnižu temperaturu na kojoj se ta legura nalazi u tečnom stanju. Na temperaturama u opsegu između likvidus i solidus vrednosti legura se nalazi u mešovitom tečno–čvrstom stanju. Legura određenog sastava čije se likvidus i solidus temperature poklapaju predstavlja eutektičku

leguru. Skup temperatura likvidusa legura različitih sastava pri konstantnom pritisku definiše likvidus linije kod dvokomponentnih sistema, odnosno likvidus površine kod višekomponentnih sistema. Analogno, skup temperatura solidusa definiše solidus linije, odnosno solidus površine. Likvidus i solidus površine kod trokomponentnih sistema su trodimenzionalnog karaktera te, shodno tome, i fazni dijagrami koje one definišu zahtevaju prostornu prezentaciju. U zavisnosti od prirode dvokomponentnih podsystema, trojni fazni dijagrami se sastoje od jedne ili više podpovršina. U cilju lakše karakterizacije legura ovi fazni dijagrami se predstavljaju u dvodimenzionalnoj formi preko projekcija niza karakterističnih linija unutar takozvanog *Gibbs*–ovog trougla (jednakostraničnog trougla na čijim stranicama se nalaze hemijski sastavi dvokomponentnih podsystema). Karakteristične linije su izoterme (preseki likvidus i solidus površine sa ravni koja predstavlja konstantnu temperaturu) i kotektičke linije (međusobni preseki likvidus odnosno solidus podpovršina). Od značaja su i presečne tačke ovih linija, odnosno tačka eutektikuma (temperatura direktnog prelaza iz tečne u čvrstu fazu) i tačka peritektikuma (temperatura pri kojoj čvrsta faza jednog oblika u reakciji sa tečnom fazom prelazi u drugi oblik). Određivanjem karakterističnih linija i tačaka višekomponentnih legura i generisanjem njihovih faznih dijagrama se bavi tzv. CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) grupa [20].

Standardni metodi za određivanje ravnoteže faza u višekomponentnim sistemima zasnivaju se na minimizaciji ukupne slobodne *Gibbs*–ove energije sistema. *CALPHAD metod* koristi više matematičkih modela za opisivanje zavisnosti *Gibbs*–ove energije od temperature, pritiska i koncentracije pojedinih faza. Na osnovu baza termodinamičkih podataka sistema nižeg reda i odgovarajućeg softvera ekstrahuju se parametri odabranog matematičkog modela i generiše fazni dijagram sistema višeg reda. Međutim, postojeće baze termodinamičkih podataka, softveri specijalizovani za generisanje prostornih dijagrama, kao i većina višekomponentnih faznih dijagrama dobijenih CALPHAD metodom su komercijalnog karaktera [100,101], te nisu javno dostupni. Stoga alternativni metodi koji omogućavaju generisanje faznih dijagrama višekomponentnih sistema na bazi javno dostupnih podataka nalaze svoju primenu. Jedan od takvih metoda je predložen u ovoj disertaciji. Nazvan je *metod površinskog modeliranja* i namenjen određivanju likvidus površina trokomponentnih sistema na bazi faznih dijagrama binarnih podsystema i minimalnog skupa eksperimentalnih podataka.

5.1.1 CALPHAD metod

Osnovni cilj CALPHAD metoda je proračun (predviđanje) ravnoteže faza u nepoznatim višekomponentnim sistemima na osnovu dostupnih informacija o konstitutivnim podsystemima nižeg reda [102]. Eksperimentalni podaci o podsystemima se koriste za optimizaciju odgovarajućih termodinamičkih parametara, čije se vrednosti verifikuju kroz generisanje poznatih faznih dijagrama i kasnije koriste za proračun nepoznatih faznih dijagrama metodom ekstrapolacije.

Sam proračun ravnoteže faza u višekomponentnim sistemima uključuje minimizaciju ukupne *Gibbs*–ove energije sistema G . To zahteva rešavanje relacije:

$$G = \sum_{i=1}^p n_i G_i^{\varphi} = \min, \quad (5.1)$$

gde je n_i broj molova, a G_i^{φ} *Gibbs*–ova energija i –te faze od ukupno p faza koje čine sistem. Zavisnost slobodne *Gibbs*–ove energije svake faze od koncentracije, temperature

i pritiska zadaje se odgovarajućom termodinamičkom funkcijom. Za opis ove funkcije koriste se različiti modeli koji uključuju niz termodinamičkih parametara.

Gibbs–ova energija pojedine faze se može razdvojiti na tri člana koji zavise od koncentracije komponenata:

$$G^{\varphi} = G^0 + G^{en} + G^{ex}. \quad (5.2)$$

Član G^0 predstavlja *Gibbs*–ovu energiju mehaničke smese konstituenata faze, G^{en} odgovara entropiji mešanja idealnog rastvora, dok član G^{ex} predstavlja takozvanu ekscesnu energiju i uključuje sva odstupanja od idealnog rastvora. Kod trokomponentnih sistema prva dva člana se definišu na bazi osnovnih zakona termodinamike, a treći član na osnovu opšte prihvaćenog *Muggianu*–ovog metoda ekstrapolacije parametara ekscesne energije dvokomponentnih sistema. Za sistem sastavljen od komponenti A , B i C , kome odgovaraju dvokomponentni podsistemi AB , AC i BC , odgovarajući članovi izraza 5.2 mogu se predstaviti u formi [103]:

$$G^0 = x_A G_A^0 + x_B G_B^0 + x_C G_C^0 \quad (5.3)$$

$$G^{en} = RT(x_A \ln x_A + x_B \ln x_B + x_C \ln x_C) \quad (5.4)$$

$$G^{ex} = x_A x_B \sum_{i=0}^2 A_{AB}^i (x_A - x_B)^i + x_A x_C \sum_{i=0}^2 A_{AC}^i (x_A - x_C)^i + x_B x_C \sum_{i=0}^2 A_{BC}^i (x_B - x_C)^i + f(T, x) x_A x_B x_C. \quad (5.5)$$

U ovim izrazima x_A , x_B i x_C predstavljaju molske udele komponenti A , B i C u sistemu, G_A^0 , G_B^0 i G_C^0 odgovarajuća referentna stanja navedenih komponenti, a R gasnu konstantu. Parametri A_{AB}^i , A_{AC}^i i A_{BC}^i zavise samo od temperature i određuju se fitovanjem zavisnosti ekscesnih *Gibbs*–ovih energija dvokomponentnih podsistema od sastava na osnovu relacija:

$$G_{AB}^{ex} = x_A^b x_B^b \sum_{i=0}^2 A_{AB}^i (x_A^b - x_B^b)^i \quad (5.6)$$

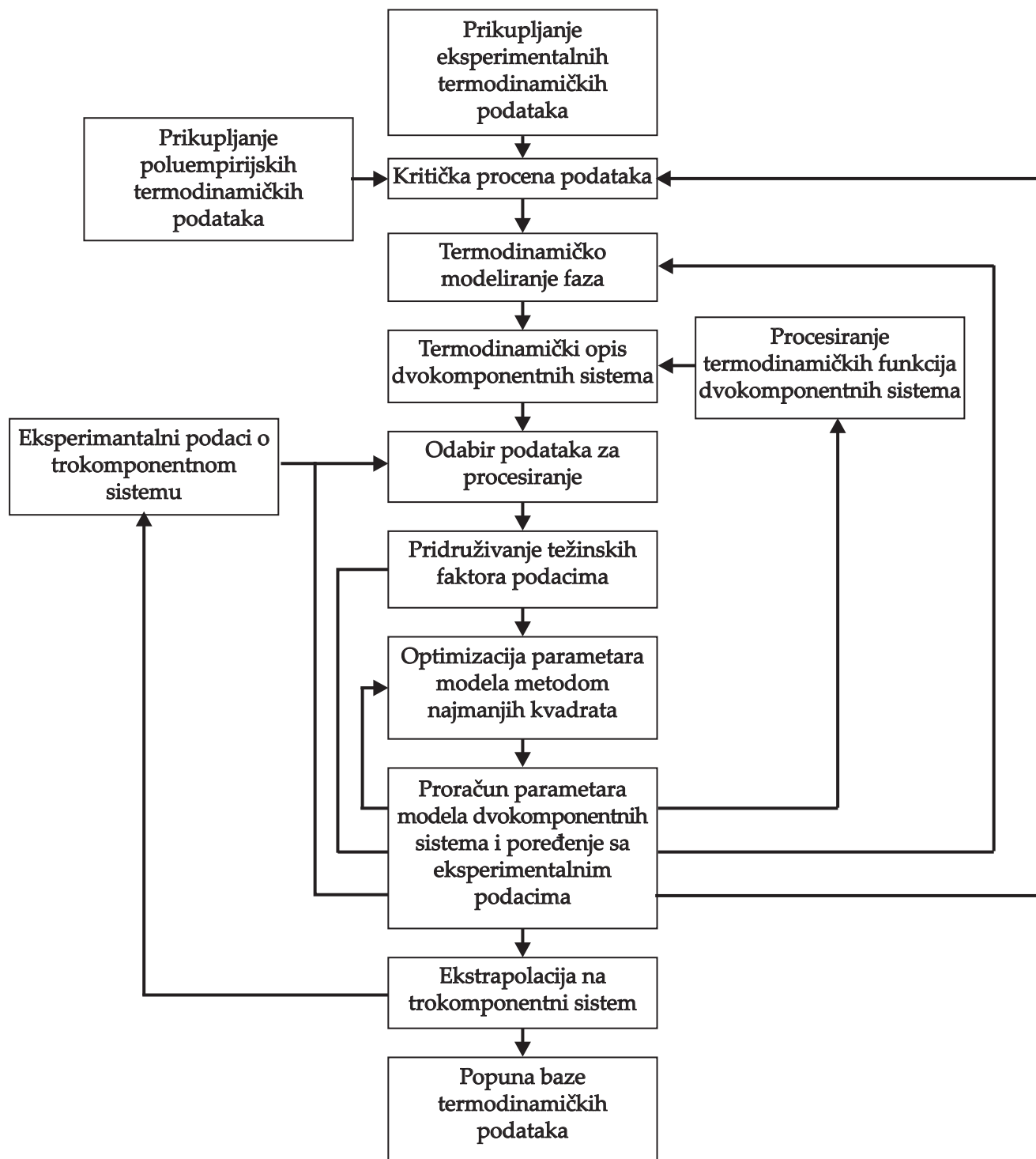
$$G_{AC}^{ex} = x_A^b x_C^b \sum_{i=0}^2 A_{AC}^i (x_A^b - x_C^b)^i \quad (5.7)$$

$$G_{BC}^{ex} = x_B^b x_C^b \sum_{i=0}^2 A_{BC}^i (x_B^b - x_C^b)^i, \quad (5.8)$$

pri čemu su x_A^b , x_B^b i x_C^b molski udeli komponenti u odgovarajućim dvokomponentnim podsistemima. Koeficijent $f(T, x)$ je trojni interakcioni koeficijent koji zavisi od temperature i molskih udela u trokomponentnom sistemu.

Uobičajena procedura predviđanja termodinamičkih karakteristika trokomponentnih sistema CALPHAD metodom je prikazana na slici 5.1.

Parametri u izrazima (5.6)–(5.8) određuju se iz eksperimentalnih podataka za svaki podsistem. Za dobijanje optimalnog seta parametara modela poželjno je uzeti u razmatranje više tipova eksperimentalnih podataka (fazni dijagrami, hemijski potencijali i entalpije), dok se kao numerička metoda koristi metoda najmanjih kvadrata. Postupak proračuna optimalnog seta parametara često se naziva i proračunom ili optimizacijom sistema. Dobijene vrednosti parametara koriste se za termodinamički opis dvokomponentnih podsistema i poređenje sa eksperimentalnim vrednostima. Metode ekstrapolacije se zatim primenjuju u cilju dobijanja termodinamičkih funkcija trokomponentnih



Slika 5.1: Procedura predviđanja termodinamičkih karakteristika trokomponentnih sistema CALPHAD metodom [104].

sistema (relacije (5.3)–(5.5)). Dobijene ekstrapolirane vrednosti predstavljaju osnov za postavku neophodnog seta eksperimentalnog ispitivanja razmatranog sistema. Rezultati eksperimenata se porede sa ekstrapoliranim i određuje trojni interakcioni koeficijent. Optimizovani set parametara se smešta u takozvanu termodinamičku bazu podataka, a na osnovu nje je moguć proračun faznih dijagrama, termodinamičkih i fizičkih osobina i simulacija procesa difuzije trokomponentnih sistema.

Za uspešnu primenu CALPHAD metoda neophodna je pouzdana baza termodinamičkih podataka kojima se opisuju pojedine faze u podsistemima, kao i pouzdani računarski programi kojima se određuje optimalan set parametara.

Dobro poznate baze termodinamičkih podataka su *SGTE* (Scientific Group Thermo-Data Europe) [105] i *FACT* (Facility for the Analysis of Chemical Thermodynamics) [106]. Ove baze, kao javno dostupne, sadrže podatke o velikom broju dvokomponentnih, ali samo o ograničenom broju trokomponentnih sistema.

Najčešće korišćeni računarski programi za proračun faznih dijagrama su *FactSage* (kompilacija starijih programa ChemSage i FACT-Win) [107], *Thermo-Calc* [108], *MT-DATA* [109], takozvani *Lucas* program [110] i najskorije objavljen *PANDAT* program [111,112]. Ovi programi se koriste za proračun ravnoteže faza, a međusobno se razlikuju po karakteristikama i korisničkom interfejsu. Osim toga, za svaki računarski program se specificira format baze termodinamičkih podataka sa kojom je obezbeđena kompatibilnost.

Nepogodnost pri primeni CALPHAD metoda je što zahteva dobro postavljene početne vrednosti za proces optimizacije parametara modela u cilju dobijanja tačnih dijagrama stabilnih faza sistema. Ovo, sa druge strane, zahteva prethodno poznavanje ispitivanog faznog dijagrama ili posebne veštine korisnika softvera. Program *PANDAT* predstavlja softver nove generacije, čiji algoritam za proračun stabilnih faza omogućava automatsko generisanje faznih dijagrama bez postavljanja početnih vrednosti [113].

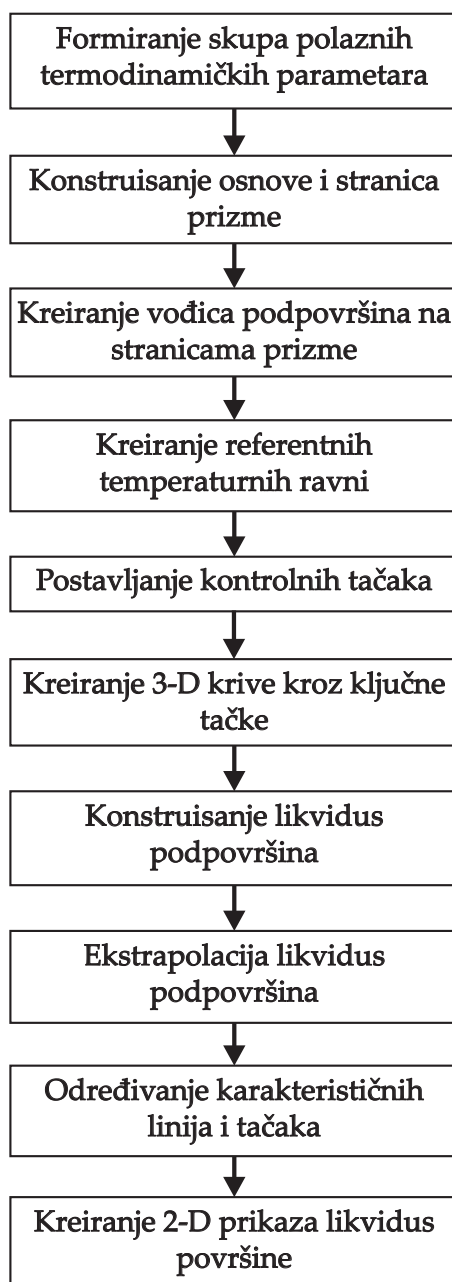
U ovoj disertaciji će kao referentni biti korišćeni rezultati proračuna faznih dijagrama trokomponentnih sistema CALPHAD metodom primenom *Thermo-Calc* programa na osnovu *SGTE* baze termodinamičkih podataka [114–116].

5.1.2 Novi metod – metod površinskog modeliranja

U geometrijskom smislu fazni dijagrami trokomponentnih sistema su ograničeni pravilnom trostranom prizmom koja se dobija spajanjem faznih dijagrama dvokomponentnih podsistema. Visina prizme predstavlja temperaturnu osu. Likvidus površina takvog sistema sastoji se od jedne ili više glatkih 3-D podpovršina koje su ograničene likvidus linijama dvokomponentnih podsistema.

Standardni softverski paketi za 3-D površinsko modeliranje koriste *NURBS*–ove (Non-Uniform Rational B-Splines) kao matematički alat za definisanje vođenih (ograničenih) površina. Složene površine se modeliraju na osnovu zadatih vođica i seta kontrolnih tačaka. Na taj način se likvidus površina nekog trokomponentnog sistema može konstruisati korišćenjem dvokomponentnih likvidus linija kao vođica i likvidus temperatura (eksperimentalno određenih za specificirane sastave) u ulozi kontrolnih tačaka. Broj likvidus podpovršina, njihove presečne linije (kotektičke linije), tačke eutektikuma i peritektikuma određuje priroda faznih dijagrama podsistema, tj. da li su izomorfni ili eutektički. Kao softverski alat se mogu iskoristiti skoro svi standardni programi za površinsko modeliranje tako da je ovaj metod generisanja 3-D faznih dijagrama trokomponentnih sistema nazvan *metodom površinskog modeliranja*.

Postupak generisanja trokomponentnih likvidus površina metodom površinskog modeliranja uz korišćenje programskog paketa SolidEdge V17 šematski je prikazan na slici 5.2.



Slika 5.2: Postupak generisanja likvidus površina trokomponentnih sistema metodom površinskog modeliranja.

Skup polaznih termodinamičkih parametara čine fazni dijagrami dvokomponentnih konstituenata sistema i odabrani set eksperimentalno određenih likvidus temperatura. S obzirom da su dvokomponentni sistemi relativno dobro proučeni i njihovi fazni dijagrami literarno dostupni, taj deo polaznih parametara nije kritičan. Sa druge strane, dostupne eksperimentalne vrednosti temperatura likvidusa trokomponentnih sistema različitog sastava su malobrojne i ponekad nepouzidane. Usled toga je značajan kritički odabir vrednosti polaznih parametara modela. Konstruisanjem ravni koje definišu osnovu i stranice jednakostranične prizme postavlja se okvir za unošenje položaja eks-

perimentalnih tačaka unutar *Gibbs*-ovog trougla i uvoz grafički predstavljenih faznih dijagrama dvokomponentnih podsistema. Likvidus linije ovih faznih dijagrama predstavljaju vođice pri kreiranju likvidus površine. Oblik likvidus linije zavisi od prirode podsistema i može da se sastoji od jednog (ako je podsistem izomorfan) ili više segmenata (ukoliko je sistem eutektički). Pri tome, tačke koje odgovaraju krajevima segmenata (za sastave sistema koji odgovaraju 100% pojedinih komponenti i tačke eutektikuma i peritektikuma) predstavljaju ključne tačke. Referentne temperaturne ravni odgovaraju usvojenim eksperimentalnim temperaturama likvidusa i na njih se projektuju odgovarajuće tačke sa *Gibbs*-ovog trougla odnosno postavljaju kontrolne tačke. Kroz ove kontrolne i navedene ključne tačke postavljaju se 3-D NURBS krive koje, zajedno sa vođicama omogućavaju formiranje glatkih, ograničenih 3-D likvidus podpovršina. Ove podpovršine su u potpunosti definisane u takozvanim uglovima faznog trougla (u okolini 100% sastava sistema), i delom u okolini ostalih ključnih i kontrolnih tačaka. U zavisnosti od broja i položaja kontrolnih tačaka za opis sistema u određenom opsegu sastava neophodna je ekstrapolacija kreiranih podpovršina na bazi kriterijuma njihove glatkosti. Time se dobija kompletan 3-D fazni dijagram trokomponentnih sistema. Karakteristične linije predstavljaju kotektičke i izotermne linije, a karakteristične tačke eutektikum i peritektikum. Kotektičke linije se određuju preko preseka susednih podpovršina, a izotermne linije preko preseka podpovršina i odgovarajuće temperaturne ravni. Tačke eutektikuma ili peritektikuma su definisane presekom kotektičkih linija. Projekcijom karakterističnih linija i tačaka na ravan osnove prizme (unutar *Gibbs*-ovog trougla) dobija se 2-D prezentacija faznog dijagrama razmatranog trokomponentnog sistema.

Generisana 3-D likvidus površina omogućava određivanje najviše temperature topljenja sistema zadatog sastava na osnovu njenog preseka sa odgovarajućom izomorfnom linijom. Takođe, moguće je definisanje sastava sistema koje karakteriše željena temperatura topljenja na bazi projekcije odgovarajuće izotermne linije u oblast *Gibbs*-ovog trougla.

5.1.3 Likvidus površine trokomponentnih sistema za primenu u termičkim prekidačima

Metod površinskog modeliranja je primenjen za generisanje likvidus površina trokomponentnih sistema tipa Bi-Sn-Pb, Sn-Pb-In i Sn-In-Ga. Ovi sistemi formiraju niz niskotopivih legura, tako da je poznavanje likvidus temperatura legura unapred definisanih sastava od interesa za projektovanje i optimizaciju lemnih spojeva termičkih prekidača.

Sistem Bi-Sn-Pb

Likvidus površina sistema Bi-Sn-Pb konstruisana je na osnovu faznih dijagrama podsistema Sn-Pb, Sn-Bi i Pb-Bi koji su preuzeti iz literature [105, 116]. Za kontrolne tačke izabrane su eksperimentalne vrednosti koje za navedeni sistem specificira jedan od najpoznatijih svetskih proizvođača niskotopivih legura [95] i navedene su u tabeli 5.1.

3-D likvidus površina sistema Bi-Sn-Pb generisana metodom površinskog modeliranja grafički je predstavljena na slici 5.3. Njena 2-D prezentacija je u vidu projekcija izotermnih i kotektičkih linija prikazana na slici 5.4. Dvokomponentni podsistemi su eutektičkog karaktera, pri čemu podsistem Pb-Bi formira nekongruentno topivo jedi-

| Kontrolna tačka | težinski % Sn | težinski % Pb | težinski % Bi | T likvidusa (°C) |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|------------------|
| 1 | 60 | 14,5 | 25,5 | 180 |
| 2 | 46 | 46 | 8 | 173 |
| 3 | 27 | 51,5 | 21,5 | 170 |
| 4 | 37 | 42 | 21 | 152 |
| 5 | 30,8 | 38,4 | 30,8 | 139 |
| 6 | 22 | 22 | 56 | 104 |
| 7 | 22 | 28 | 50 | 100 |
| 8 | 15,5 | 32 | 52,5 | 95 |

Tabela 5.1: Eksperimentalne vrednosti likvidus temperatura legura Bi–Sn–Pb [95].

njenje, tako da se na slici 5.3 mogu uočiti četiri podpovršine koje se seku duž kotektičkih linija, a ove u tačkama eutektikuma (E) i peritektikuma (P).

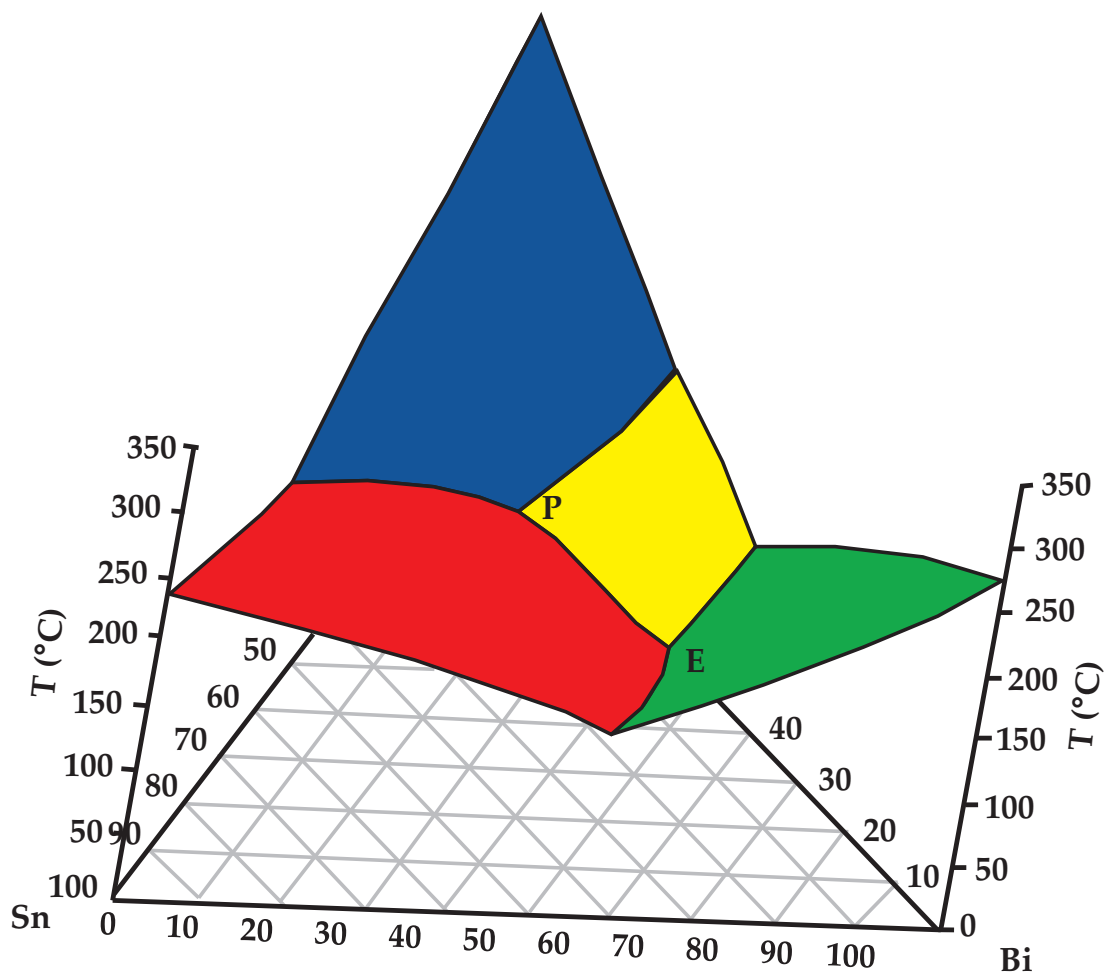
Poređenja radi, na slici 5.4 crnim linijama su prikazane projekcije likvidus površine sistema Bi–Sn–Pb proračunate CALPHAD metodom [116], kao i kontrolne tačke iz tabele 5.1 dobijene eksperimentalnim putem. Može se videti da postoji dosta dobro slaganje izotermnih linija generisanih putem oba metoda. Veće razlike se javljaju jedino u slučaju izotermnih linija definisanih za 150 °C. Na osnovu činjenice da je izotermna linija generisana novim metodom za 150 °C veoma blizu kontrolne tačke 4 (152 °C), a da je izotermna linija generisana CALPHAD metodom za 150 °C znatno bliža kontrolnoj tački 5 (139 °C), može se zaključiti da metod površinskog modeliranja daje bolje slaganje sa eksperimentalnim vrednostima. Kao posledica razlika izotermnih linija javlja se i neslaganje kotektičkih linija. Naime, presek kotektičkih linija (peritektikum) je po metodu površinskog modeliranja u tački 139,6 °C (25%Bi–29%Sn–46%Pb), a po CALPHAD metodu u tački 135,7 °C (30,5%Bi–21,9%Sn–47,6%Pb). Sa druge strane, tačke eutektikuma određene na oba načina dobro se slažu i sasvim su bliske kontrolnoj tački 8 (95 °C).

Sistem Sn–Pb–In

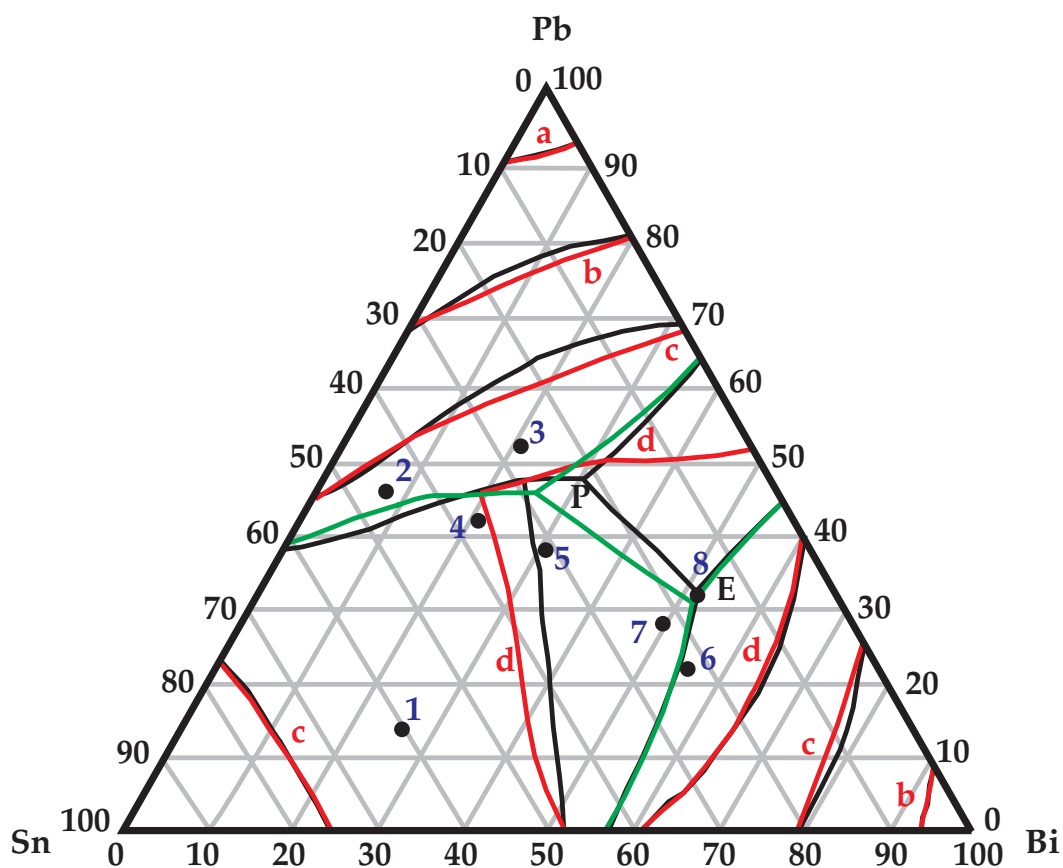
Termodinamički opis ovog sistema se retko nalazi u literaturi [19,115] uprkos činjenici da se njegove legure koriste u procesu površinskog montiranja komponenata u uređajima koji ne rade u visokotemperaturnim uslovima. Podsystemi Sn–Pb, Sn–In i Pb–In su relativno dobro poznati i njihovi fazni dijagrami na osnovu kojih je konstruisana likvidus površina su preuzeti iz [106]. Eksperimentalne vrednosti temperatura likvidusa ovog sistema (kontrolne tačke za metod površinskog modeliranja) specificirane u tabeli 5.2 preuzete su iz [95] (tačke 1–4) i [115] (tačke 5–7).

| Kontrolna tačka | težinski % Sn | težinski % Pb | težinski % In | T likvidusa (°C) |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|------------------|
| 1 | 37,5 | 37,5 | 25 | 181 |
| 2 | 70 | 18 | 12 | 167 |
| 3 | 54 | 26 | 20 | 154 |
| 4 | 40 | 20 | 40 | 130 |
| 5 | 60,5 | 31,5 | 8 | 170 |
| 6 | 57 | 19 | 24 | 147 |
| 7 | 50,5 | 5,5 | 24 | 124 |

Tabela 5.2: Eksperimentalne vrednosti likvidus temperatura legura Sn–Pb–In [95, 115].

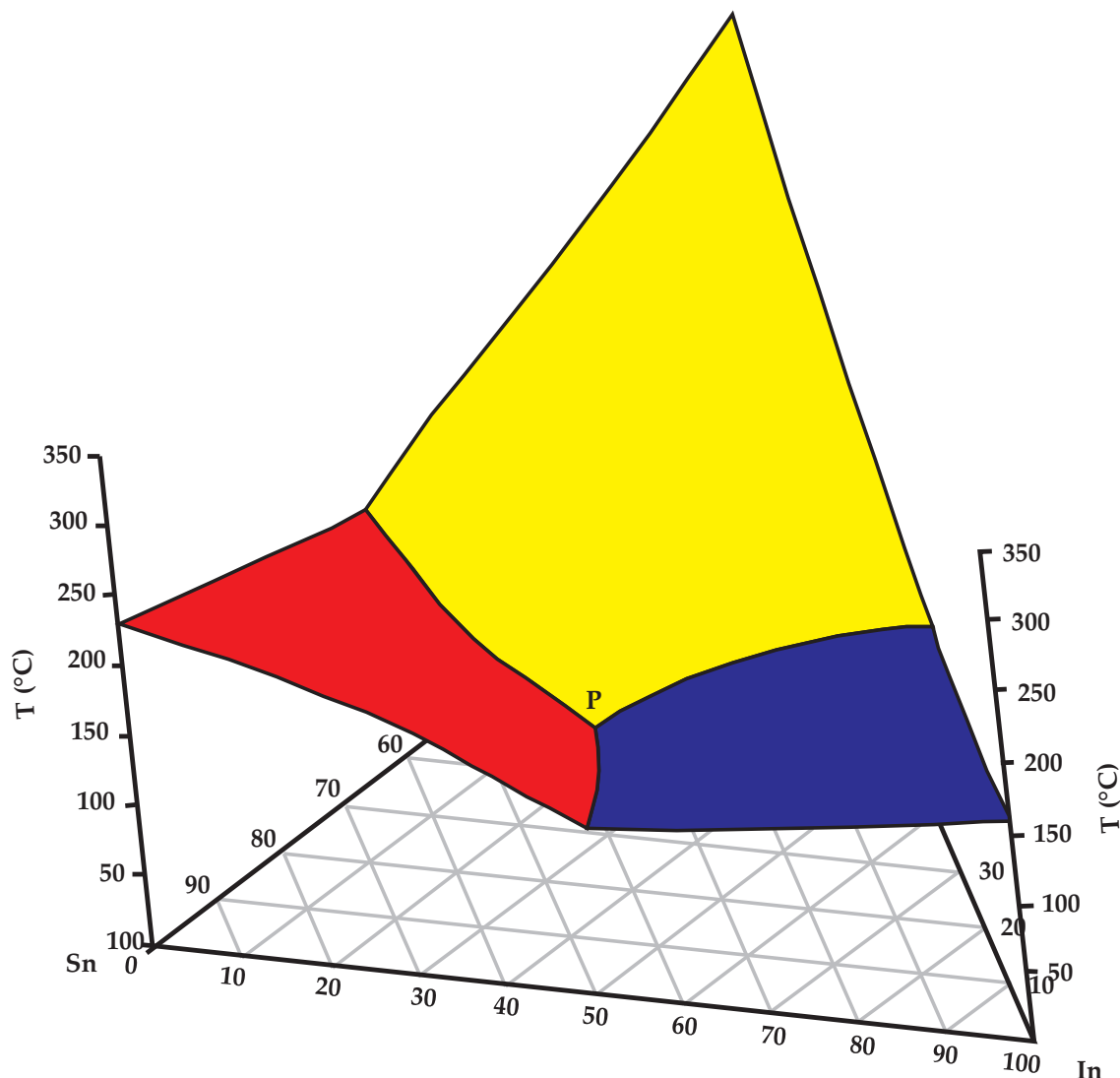


Slika 5.3: Likvidus površina sistema Bi–Sn–Pb generisana metodom površinskog modeliranja.



Slika 5.4: 2-D prezentacija faznog dijagrama sistema Bi-Sn-Pb generisanog metodom površinskog modeliranja (crvene i zelene linije) i CALPHAD metodom [116] (crne linije); Izotermne linije su za: a) 300 °C, b) 250 °C, c) 200 °C, d) 150 °C; kontrolne tačke iz tabele 5.1 prikazane su punim kružnim simbolima.

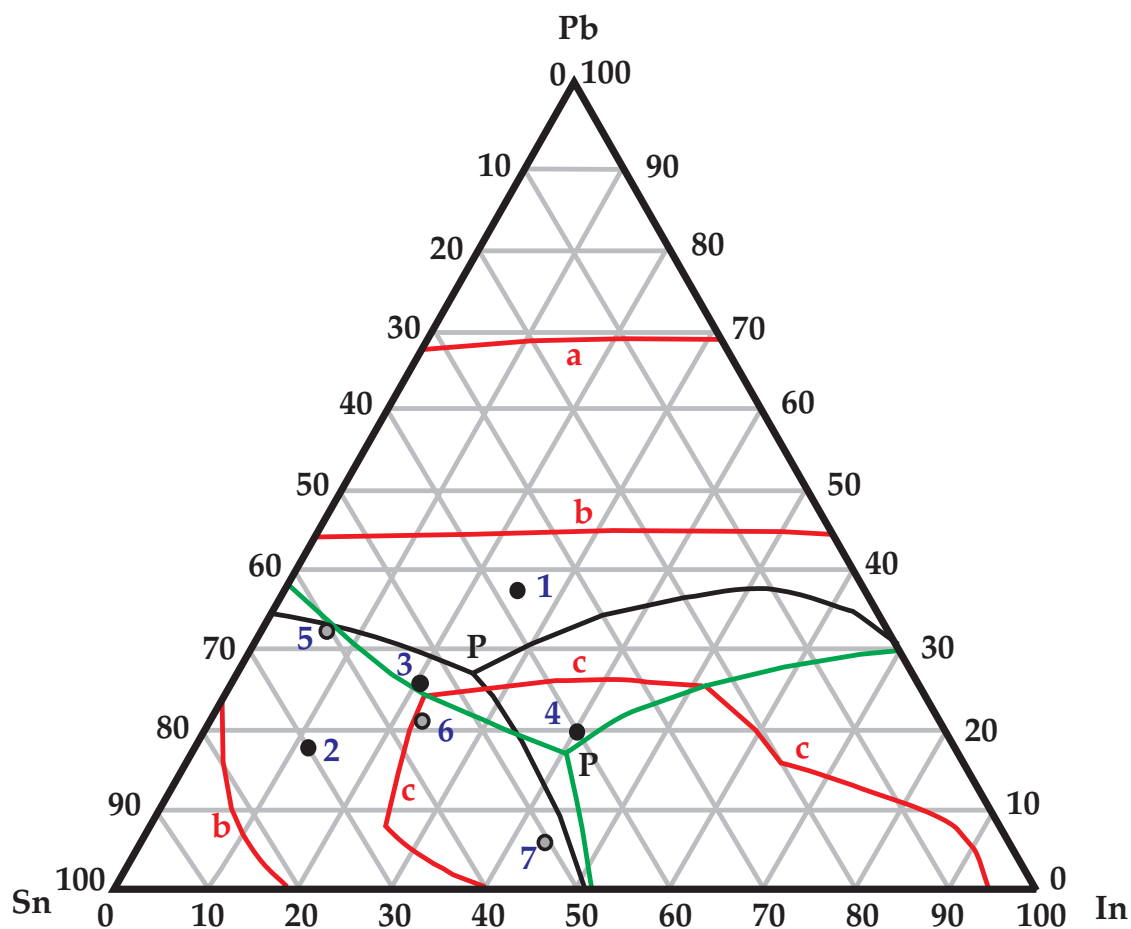
Likvidus površina sistema Sn–Pb–In generisana metodom površinskog modeliranja je u 3–D formi prikazana na slici 5.5. Pošto dvokomponentni podsistemi Sn–Pb i Sn–In imaju eutektički, a podsistem Pb–In peritektički karakter, na likvidus površini se izdvajaju tri podpovršine koje se seku duž kotektičkih linija i formiraju tačku peritektikuma (P).



Slika 5.5: Likvidus površina sistema Sn–Pb–In generisana metodom površinskog modeliranja.

Projekcije kotektičkih i izabраниh izotermnih linija u oblast *Gibbs*–ovog trougla omogućavaju 2–D prikaz likvidus površine kao što je predstavljeno na slici 5.6. Istovremeno su crnom linijom prikazane i projekcije kotektičkih linija dobijene CALPHAD metodom [115], kao i kontrolne tačke iz tabele 5.2.

Razlike između kotektičkih linija kod dva prikazana metoda postoje usled različitog izbora referentnih eksperimentalnih tačaka. Iz istih razloga se tačka peritektikuma određena metodom površinskog modeliranja $123,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (42,5%Sn–17,5%Pb–40%In) i CALPHAD metodom $134,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (47,5%Sn–27,6%Pb–24,9%In) razilaze. Naime, na osnovu tabele 5.2, legura sastava 70%Sn–18%Pb–12%In za temperature iznad $167\text{ }^{\circ}\text{C}$ treba da sadrži samo tečnu fazu. Rezultati CALPHAD proračuna ovom sastavu na temperaturi od $172\text{ }^{\circ}\text{C}$ pripisuju i tečnu i čvrstu fazu [115]. Imajući u vidu da je navedena kontrolna tačka

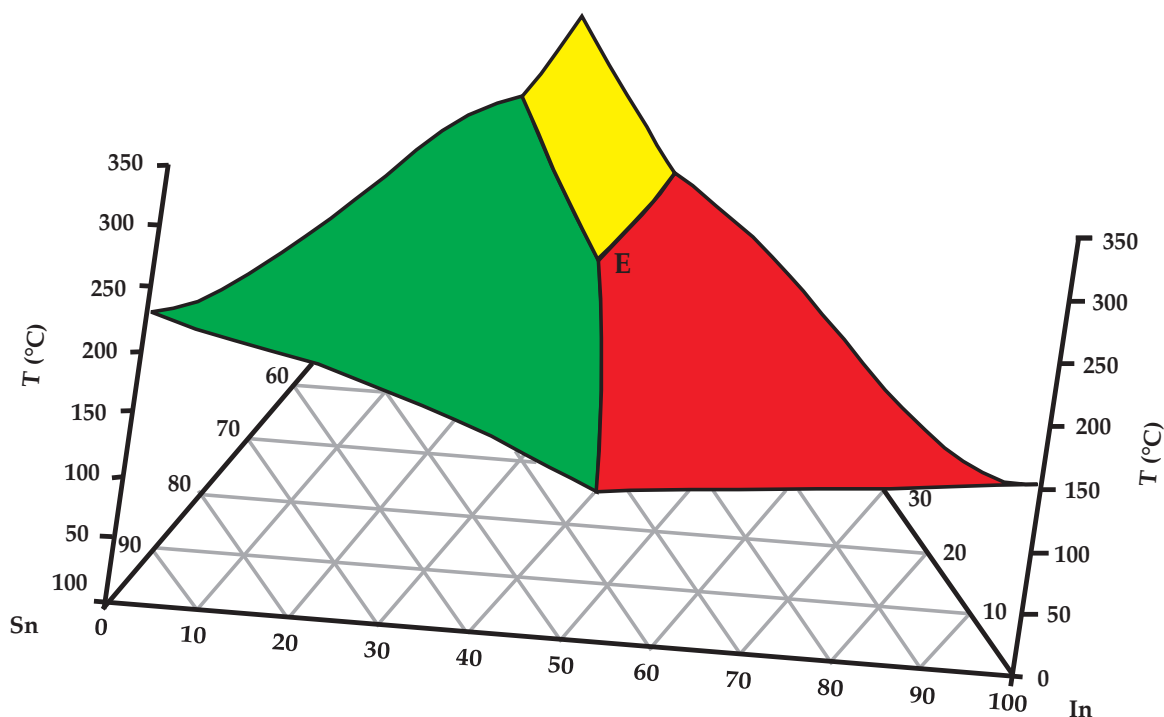


Slika 5.6: 2-D prezentacija faznog dijagrama sistema Sn-Pb-In generisanog metodom površinskog modeliranja (crvene i zelene linije) i CALPHAD metodom [115] (crne linije); Izotermne linije su za: a) 250 °C, b) 200 °C, c) 150 °C; kontrolne tačke iz tabele 5.2 prikazane su punim kružnim simbolima.

uzeta iz baze podataka koju specificira svetski vodeći proizvođač legura indijuma [95], likvidus površina generisana metodom površinskog modeliranja se može smatrati korektnom za usvojeni set eksperimentalnih vrednosti. Sa druge strane, sa slike 5.6 se uočava da su izoterme za 250 °C i 200 °C glatke krive, dok dve krive za 150 °C pokazuju iskrivljenost kao rezultat prilagođenja likvidus površine kontrolnim eksperimentalnim vrednostima. Izvodi se zaključak da, bez obzira na primenjenu metodologiju, nedostatak pouzdanih eksperimentalnih vrednosti za trokomponentnu temperaturu likvidusa unosi određeni stepen nesigurnosti u proračun likvidus površina.

Sistem Sn–In–Ga

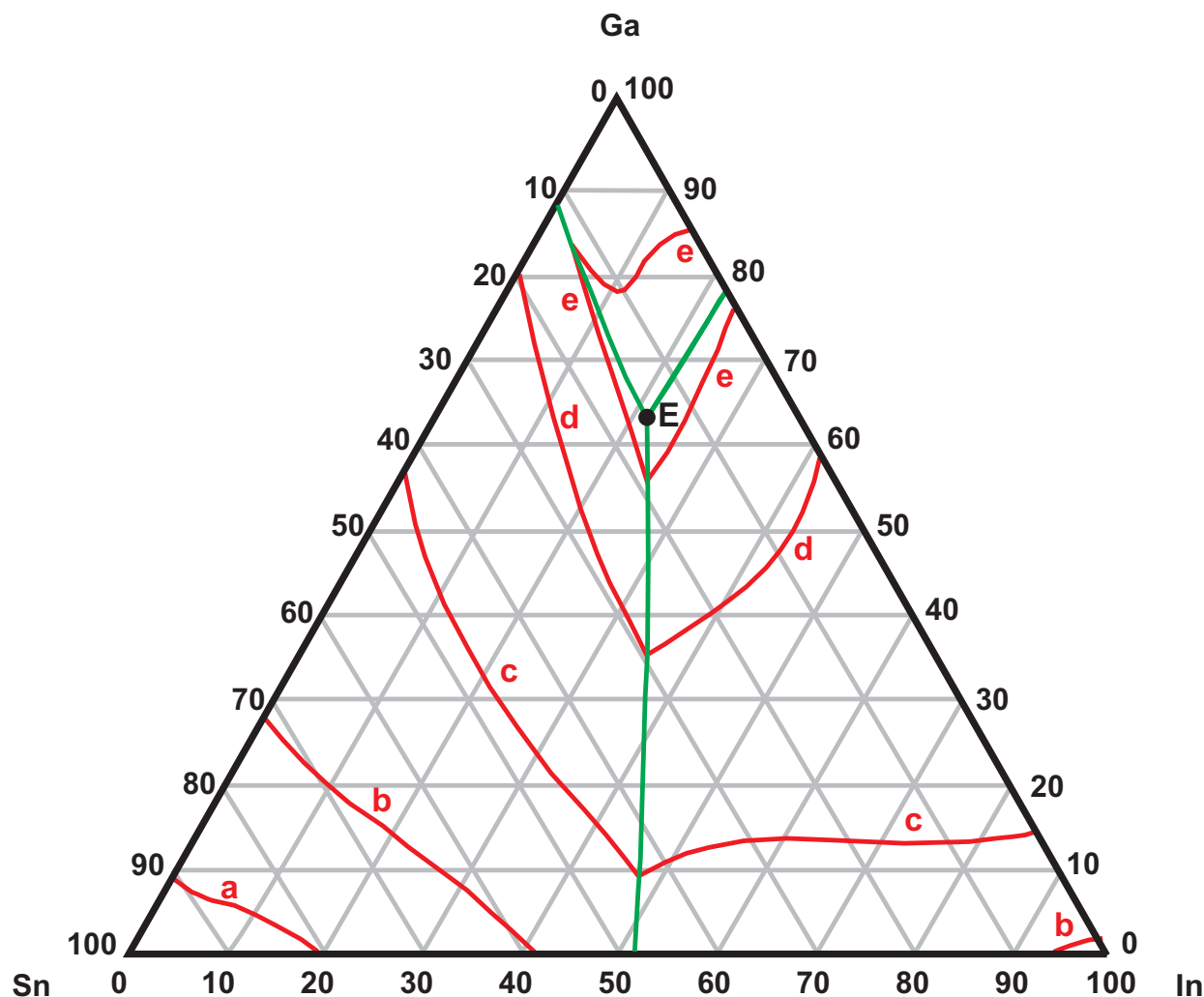
Sistem tipa Sn–In–Ga je interesantan zbog činjenice da ne sadrži olovo. Naime, u svetu postoji težnja da se olovo potpuno eliminiše iz tehnologije lemljenja iz ekoloških razloga. Likvidus površina ovog sistema konstruisana je na osnovu faznih dijagrama pod sistema Sn–In, Sn–Ga i In–Ga preuzetih iz [106] i jedine literaturno dostupne kontrolne tačke 10,7 °C (16%Sn–21,5%In–62,5%Ga) preuzete iz [95]. Svi pod sistemi su eutektički, tako da se na generisanoj 3–D likvidus površini izdvajaju samo 3 podpovršine i jedna tačka eutektikuma (E), što se može videti na slici 5.7.



Slika 5.7: Likvidus površina sistema Sn–In–Ga generisana metodom površinskog modeliranja.

Projekcije izotermnih i kotektičkih linija faznog dijagrama sistema Sn–In–Ga generisanog metodom površinskog modeliranja prikazane su na slici 5.8. S obzirom da u literaturi ne postoje podaci o faznom dijagramu ovog sistema (osim navedene kontrolne tačke koja je istovremeno i tačka eutektikuma), nedostaje poređenje sa vrednostima modeliranim nekim drugim metodom ili dobijenim eksperimentalnim putem. Specifičnost sistema Sn–In–Ga je u tome da obrazuje čitav niz legura koje se na sobnoj temperaturi nalaze u tečnom stanju. Njihovi hemijski sastavi se mogu očitati sa slike 5.8 i to u okviru oblasti koja je ograničena izotermama definisanim za 20 °C. Ove legure su od značaja za

primenu u uređajima čiji će se rad odvijati u niskotemperaturnim sredinama. Međutim, imaju nedostatak koji se ogleda u relativno visokoj ceni (zbog visokog sadržaja Ga i In) i neophodnosti obezbeđenja posebnih tehnoloških uslova procesiranja (temperatura nižih od 10 °C).



Slika 5.8: 2–D prezentacija faznog dijagrama sistema Sn–In–Ga generisanog metodom površinskog modeliranja. Izotermne linije su za: a) 200 °C, b) 150 °C, c) 100 °C, d) 50 °C, e) 20 °C.

5.2 Mikrostrukturalna karakterizacija niskotopivih legura za primenu u termičkim prekidačima

Ispitivanje mikrostrukturnih karakteristika legura koje čine lemne listove omogućava specificiranje uslova njihovog procesiranja, kao i predviđanje mehaničkih karakteristika lemnih spojeva [18,117]. Naime, struktura i veličina zrna određuju čvrstoću materijala [18,56], dok sastav zrna posredno utiče na kvašenje lemnih površina [17,19].

Zaštita uređaja za zagrevanje vode zahteva upotrebu termičkih prekidača sa nominalnom radnom temperaturom ispod 100 °C. Na osnovu proračuna likvidus površine

trokomponentnog sistema Bi–Sn–Pb opisanog u prethodnom poglavlju, za izradu prekidača ove namene se može iskoristiti legura sastava 52,5%Bi–15,5%Sn–32%Pb. Ovo je eutektička legura čija je temperatura topljenja 95 °C. Sa druge strane, kod snažnih elektromotora zahteva se nominalna radna temperatura prekidača ispod 150 °C. U tu svrhu se za realizaciju lemnih listova koristi legura 58%Bi–42%Sn. Ona je takođe eutektičkog karaktera sa temperaturom topljenja od 138 °C. Sa ciljem predviđanja efikasnosti primene ovih legura u realizaciji odgovarajućih termičkih prekidača, izvršena je njihova mikrostrukturalna karakterizacija. S obzirom da dvokomponentna legura Bi–Sn predstavlja podsistem trokomponentnog Bi–Sn–Pb sistema, karakterizacija ovog para legura je značajna i za procenu kvaliteta lemnih spojeva ostvarenih legurom 58%Bi–42%Sn na osnovi koja sadrži Pb [17].

Mikrostrukturalna analiza je izvršena na uzorcima uzetim od izlivaka legura, pri čemu je analizirana prelomna (unutrašnja) i fizička (spoljašnja) površina. Ispitivanjem SEM (Scanning Electron Microscopy) tehnikom utvrđena je forma zrna, dok je EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) tehnikom određen njihov sastav.

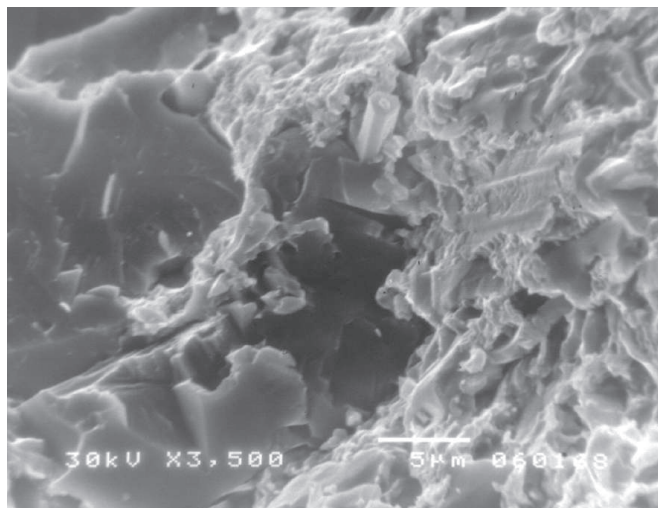
SEM snimak i EDS spektri uzeti sa prelomne površine uzorka legure 52,5%Bi–15,5%Sn–32%Pb su prikazani na slici 5.9. Uočava se zrnasta struktura pri čemu veličina i sastav zrna nisu uniformni. Veća zrna sadrže Bi sa udelom od oko 90% (slika 5.9(b)), dok kod manjih zrna Bi i Pb dominiraju nad Sn (slika 5.9(c)).

Rezultati ispitivanja spoljašnje površine uzorka legure 52,5%Bi–15,5%Sn–32%Pb prikazani na slici 5.10 ukazuju na laminarnu strukturu u kojoj dominira Sn sa sadržajem preko 80%.

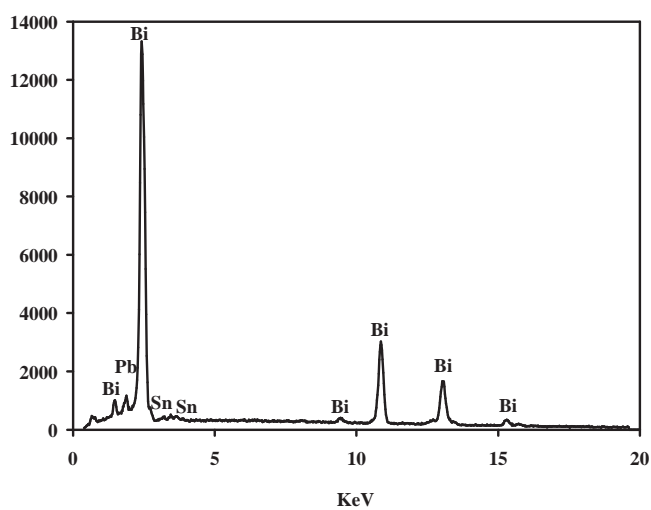
Sa slike 5.11 koja prikazuje SEM snimak i EDS spektar prelomne površine uzorka legure 58%Bi–42%Sn uočava se da i ona ima zrnastu strukturu. U odnosu na trokomponentnu leguru ovde su zrna uniformnija, manje veličine i približnog su sastava 70%Bi i 30%Sn. Manja veličina zrna doprinosi boljim mehaničkim karakteristikama ove legure, a time i većoj pouzdanosti od nje realizovanih lemnih spojeva [19].

Mikrostrukturalna spoljašnje površine uzorka legure 58%Bi–42%Sn je izrazito laminarnog karaktera kao što se uočava sa slike 5.12, koja prikazuje odgovarajući SEM snimak i EDS spektar. Pri tome u sastavu laminarnih listova preovlađuje Sn sa 80%.

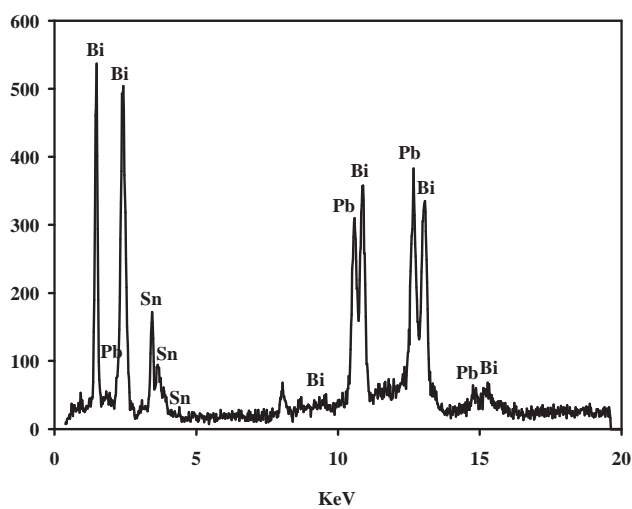
Činjenica da na spoljašnjim površinama obeju legura dominira kalaj od izuzetne je važnosti za procesiranje ovih materijala tokom proizvodnje termičkih prekidača. Naime, izlivci legura se postupcima hladnog valjanja i sečenja dovode u formu listova, a ovi procesom lemljenja spajaju sa bakarnim izvodima. S obzirom da se bakarni izvodi u pripremi lemljenja prevlače slojem kalaja ili nikla, veliki sadržaj kalaja na površini listova omogućava bolje kvašenje lemnih površina [19], a time i kvalitetnije lemne spojeve. Imajući u vidu da temperaturni odziv lemnih spojeva predstavlja osnov funkcionisanja termičkih prekidača, njihov kvalitet utiče na kvalitet samih prekidača.



(a)

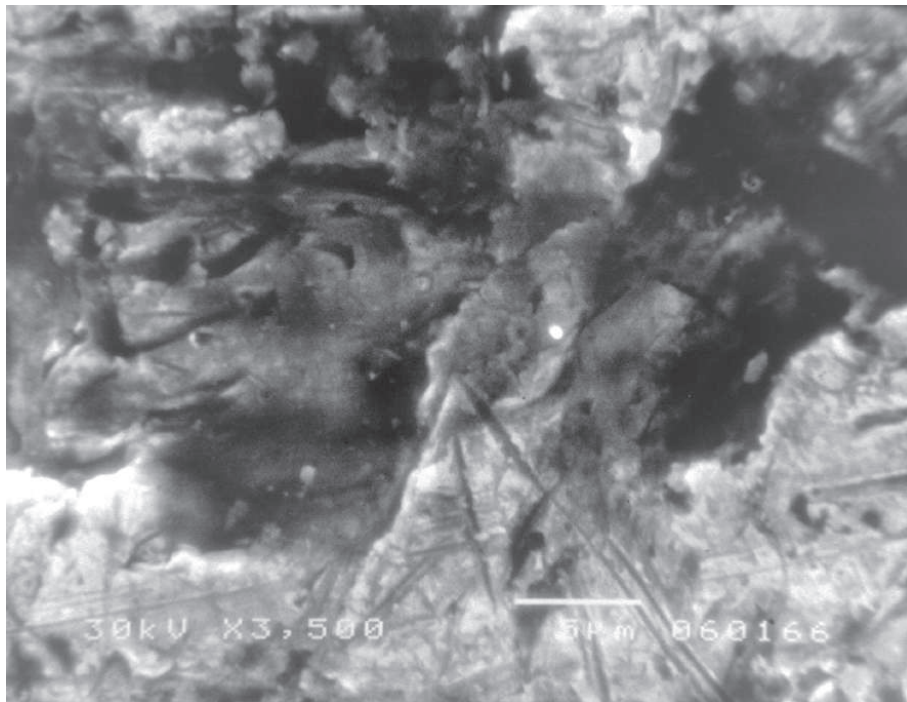


(b)

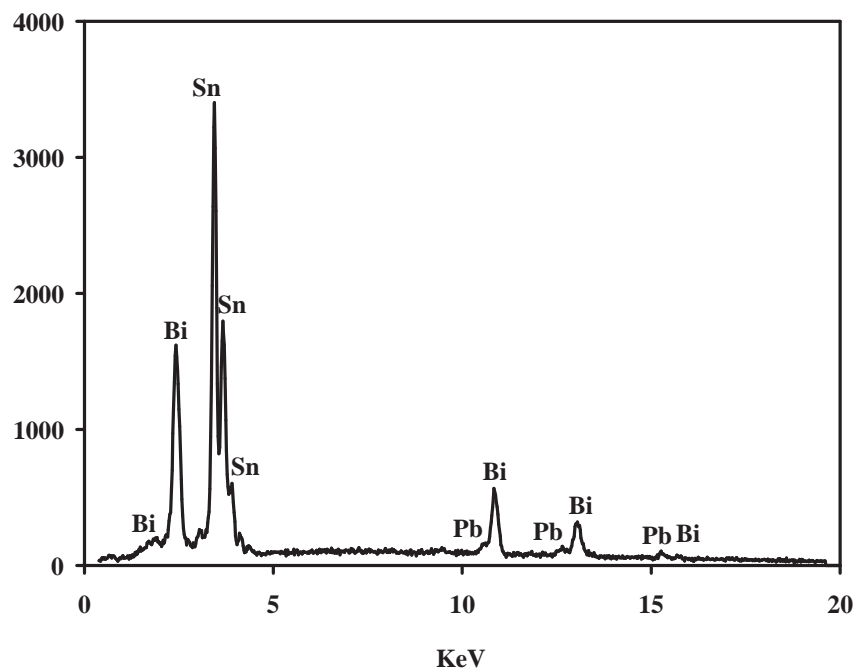


(c)

Slika 5.9: SEM snimak (a) i EDS spektri (b,c) uzeti sa prelomne površine uzorka legure 52,5%Bi–15,5%Sn–32%Pb. Spektar (b) odgovara oblasti na levoj, a spektar (c) desnoj strani SEM snimka.

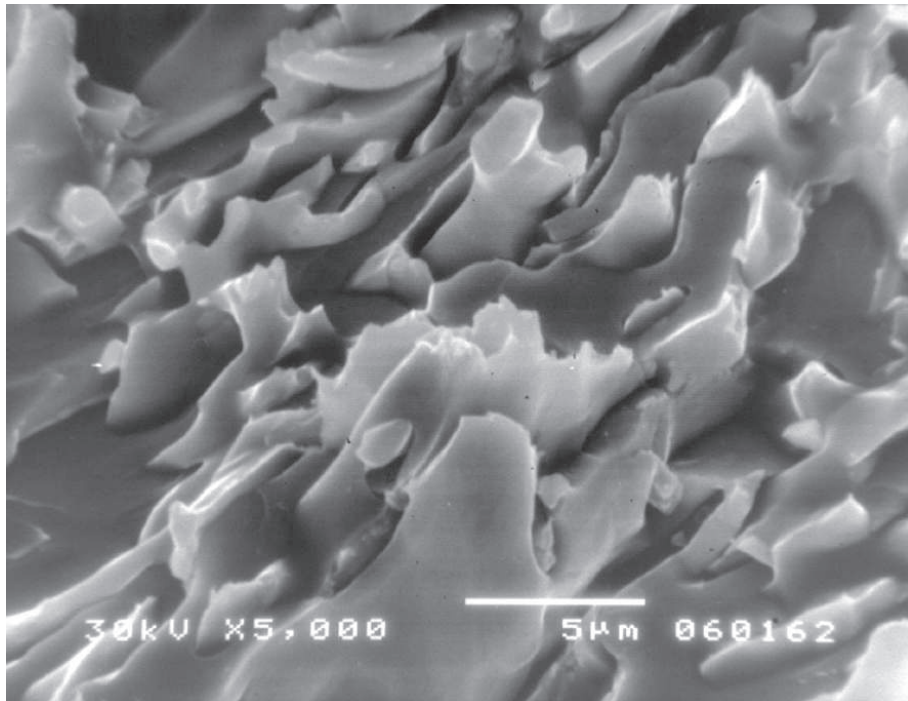


(a)

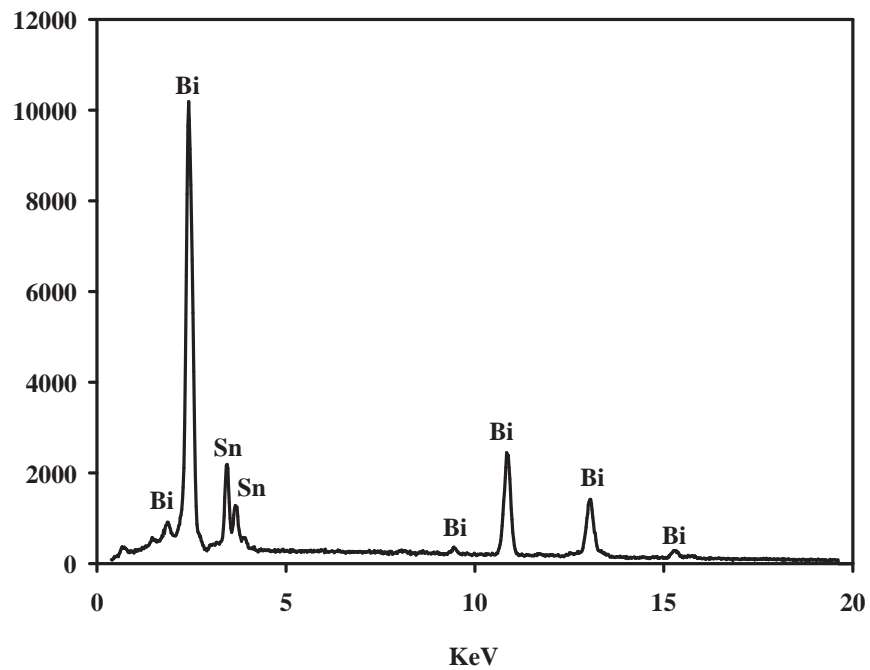


(b)

Slika 5.10: SEM snimak (a) i EDS spektar (b) uzeti sa spoljašnje površine uzorka legure 52,5%Bi-15,5%Sn-32%Pb.

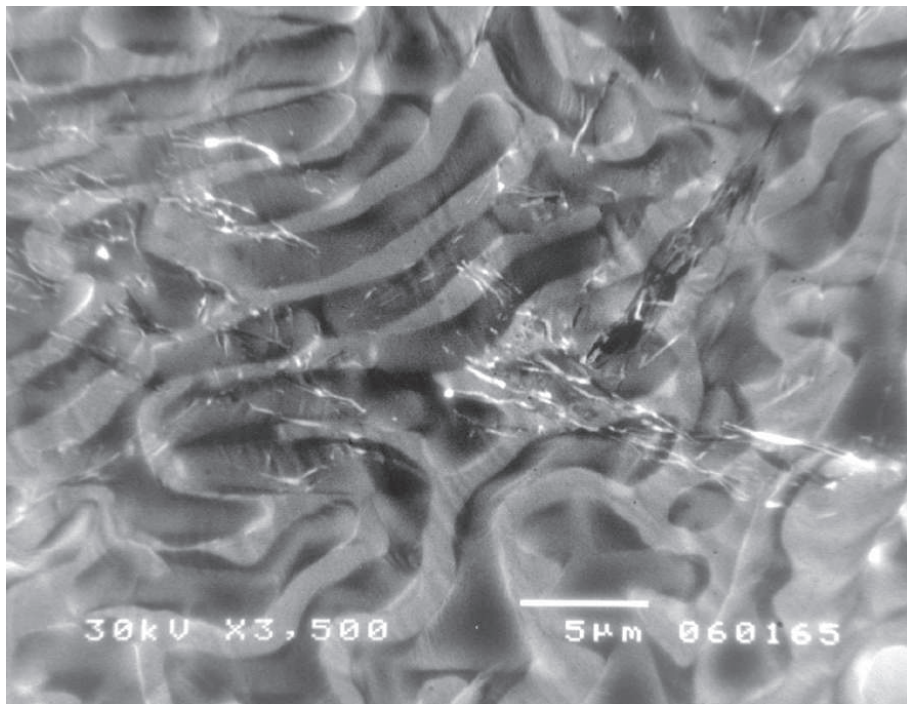


(a)

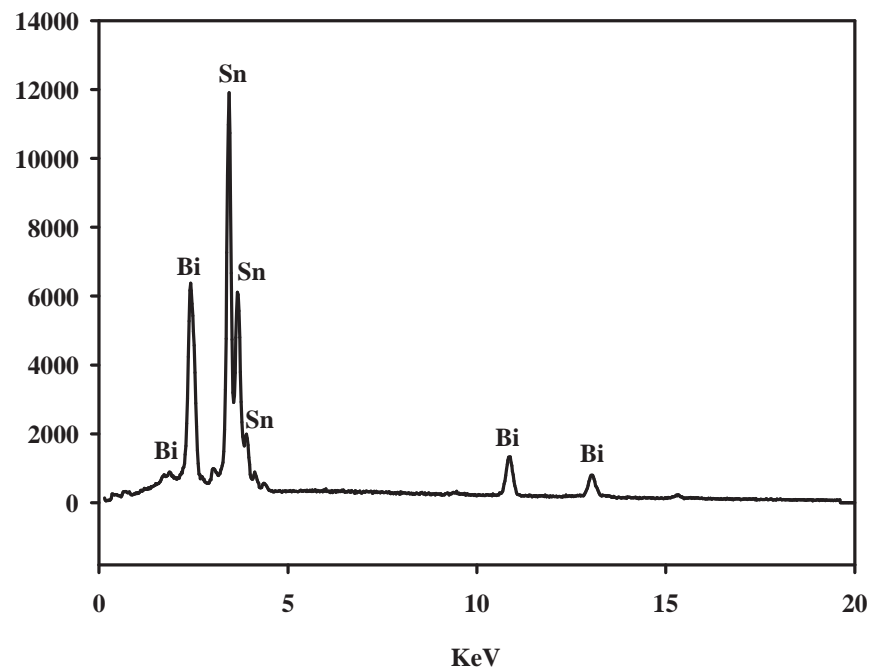


(b)

Slika 5.11: SEM snimak (a) i EDS spektar (b) uzeti sa prelomne površine uzorka legure 58%Bi-42%Sn.



(a)



(b)

Slika 5.12: SEM snimak (a) i EDS spektar (b) uzeti sa spoljašnje površine uzorka legure 58%Bi-42%Sn.

Glava 6

3–D simulacija termičkih prekidača u električnom i termičkom domenu

Parametri funkcionisanja, kao i vrednosti osnovnih pokazatelja funkcionalnosti, kvaliteta i pouzdanosti termičkih prekidača se razmatraju u postupcima njihovog projektovanja i optimizacije. Simulacija termičkih prekidača u električnom i termičkom domenu u mnogome olakšava i ubrzava ove postupke. Rezultati simulacije omogućavaju definisanje optimalnih dimenzija elemenata termičkih prekidača, kao i predviđanje vremena odziva za zadate radne uslove i parametre pouzdanosti.

6.1 Opis razmatranih termičkih prekidača

Za zaštitu snažnih elektromotora i uređaja za zagrevanje vode kod kojih je nominalna vrednost radnog napona 250 V, a nominalna vrednost struje dostiže 12 A koriste se termički prekidači radijalnog tipa konstrukciono izvedeni sa oprugom i smešteni u plastično kućište koji su opisani u poglavlju 4.2. Karakteristične dimenzije elemenata termičkih prekidača projektovanih na osnovu datih postavki i korišćenih pri 3–D simulaciji su navedene u tabeli 6.1.

Osnovna projektovana konstrukcija termičkih prekidača uključuje izvode bez posebno oblikovanih kontaktnih glava, debljinu provodne trake od 1,2 mm i debljinu zidova kućišta od 1 mm. U postupku optimizacije prekidača dodatno su razmatrane realizacije izvoda sa posebno formiranom kontaktnom glavom (što uslovljava izmenjeni prečnik lemnih listova), dve izmenjene vrednosti debljine provodne trake, kao i smanjena debljina zidova kućišta. Opruga je modelirana kao cilindar čiji prečnik osnove odgovara prečniku opruge, a visina dužini opruge.

Materijali za realizaciju termičkih prekidača su izabrani saglasno razmatranjima datim u poglavlju 4.3. U postupku simulacije kao materijal izvoda i provodne trake je uzet bakar bez razmatranja sloja prevlake. Kao materijal lemnih listova izabrane su niskotopive legure čija je karakterizacija za ove namene opisana u poglavlju 5.2. To su legure sastava 52,5%Bi–15,5%Sn–32%Pb i 58%Bi–42%Sn, čije su temperature topljenja 95 °C i 138 °C, respektivno. Ovim temperaturama su određene temperature prekidanja razmatranih prekidača i shodno tome definisana njihova dva tipa: S–95 i S–138. Kućište se izrađuje od samogasive plastike i u ovom slučaju je izabran polikarbonat – *Makrolon* koga odlikuje izuzetna otpornost na mehaničko naprezanje, nizak koeficijent termičkog širenja, visoka termička otpornost i čvrstoća pri niskim temperaturama [118]. S obzirom da se opruga uzima kao standardni element, za materijal od koga je izrađena se usvaja

| Element | Materijal | Karakteristična dimenzija | Vrednost (mm) |
|----------------|--------------------|---------------------------|---------------|
| Izvod | Bakar | Dužina | 57 |
| | | Prečnik | 1,2 |
| | | Prečnik kontaktne glave | 1,6 |
| | | Debljina kontaktne glave | 0,25 |
| | | Dužina izvoda van kućišta | 50 |
| Provodna traka | Bakar | Dužina | 5,6 |
| | | Širina | 1,6 |
| | | Debljina | 0,6; 0,9; 1,2 |
| Lemni list | Niskotopiva legura | Prečnik | 1,2; 1,6 |
| | | Debljina | 0,15 |
| Kućište | Makrolon | Visina | 11 |
| | | Širina | 8,8 |
| | | Debljina | 3,8 |
| | | Visina poklopca | 4 |
| | | Debljina zidova | 1; 0,5 |
| Opruga | Čelik | Prečnik | 1 |
| | | Dužina | 3 |

Tabela 6.1: Dimenzije razmatranih termičkih prekidača.

čelik. Kao izolacioni fluid unutar kućišta je razmatran vazduh.

Fizički, termički i električni parametri materijala od kojih su izrađeni sastavni elementi termičkih prekidača korišćeni u postupku simulacije prikazani su u tabeli 6.2.

6.2 Postupak simulacije termičkih prekidača

3-D simulacija karakteristika termičkih prekidača u termičkom i električnom domenu realizovana je računarskim programom ANSYS 8.0 opisanim u poglavlju 2.2. Međusobna zavisnost termičkih i električnih karakteristika ostvarena je korišćenjem modula *Multiphysics* kroz analizu spregnutih domena direktnim metodom. Simulaciona procedura prati tok definisan na slici 2.2, dok su koraci postupka predprocesiranja simulacije prikazani na slici 6.1.

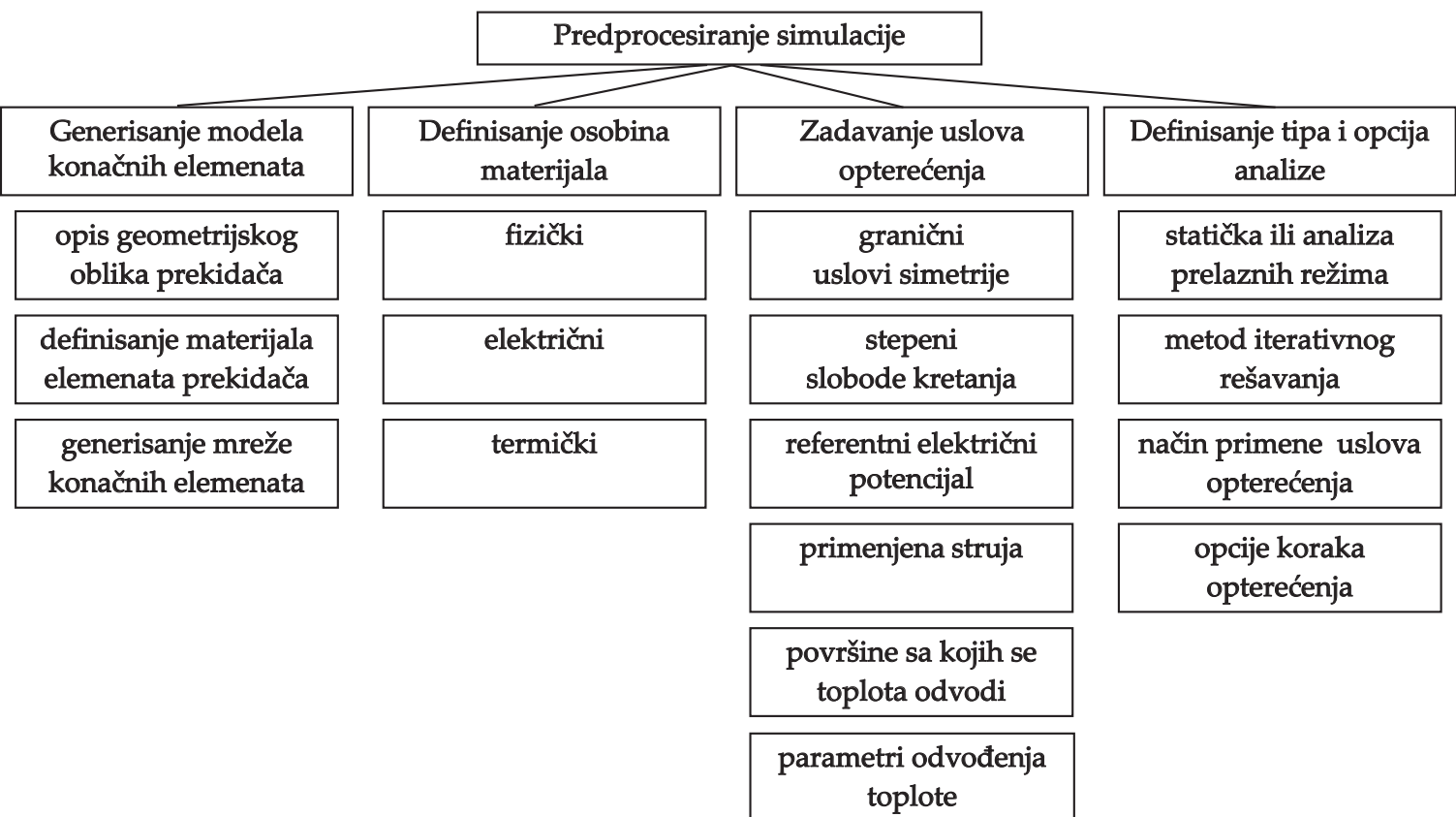
Određivanje termičkih parametara funkcionalnosti, kvaliteta i pouzdanosti termičkih prekidača uz odgovarajuća električna ograničenja zahteva njihovu simulaciju kako u vremenski ustaljenom, tako i u promenljivom režimu rada. Usled toga izvršene su odgovarajuće statičke i analize prelaznih režima. U rešavanje problema uključen je nelinearni iterativni *Newton-Raphson*-ov metod, pri čemu je i ovde izabran SOLID98 tip konačnih elemenata. Kod vremenski promenljivih analiza primenjena je nagla promena graničnih uslova opterećenja uz adekvatno izabrane potkorake.

Model konačnih elemenata prekidača generisan je primenom zapreminskog modeliranja, a vrednosti fizičkih, električnih i termičkih parametara materijala zadate na osnovu tabele 6.2.

Mehaničkim uslovima opterećenja definisani su granični uslovi simetrije i stepeni slobode kretanja termičkih prekidača. Ravan preseka prikazana na slici 4.1 predstav-

| Materijal/ Parametar | Cu | 52,5%Bi- 15,5%Sn- 32%Pb | 58%Bi- 42%Sn | Makrolon | Čelik | Vazduh |
|--|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Tačka topljenja (K)/(°C) | 1356/1083 | 368/95 | 411/138 | 563/290 | 1791/1518 | |
| Gustina (kg/m ³) | 8960 | 9600 | 8560 | 1200 | 7850 | 1,205 |
| Termička provodnost (W/mK) | 401 | 13 | 18,4 | 0,2 | 50 | 0,026 |
| Specifični toplotni kapacitet (J/kgK) | 385 | 151 | 167 | 1172 | 460 | 1005 |
| Koeficijent linearnog termičkog širenja (1/K) | $16,5 \cdot 10^{-6}$ | $2,5 \cdot 10^{-5}$ | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | $6,5 \cdot 10^{-5}$ | $1,2 \cdot 10^{-5}$ | $3,4 \cdot 10^{-3}$ |
| Specifična električna otpornost (Ωm) | $1,69 \cdot 10^{-8}$ | $7,48 \cdot 10^{-7}$ | $3,82 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{14}$ | $1,69 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{14}$ |
| Temp. koeficijent specifične električne otpornosti (1/K) | $4,29 \cdot 10^{-3}$ | | | | | |

Tabela 6.2: Fizički, termički i električni parametri materijala razmatranih termičkih prekidača [90,95,116,118,119].



Slika 6.1: Koraci postupka predprocesiranja simulacije.

lja ravan simetrije simulirane strukture, dok je mehaničko kretanje ograničeno na slobodnim krajevima izvoda. Električni uslovi opterećenja su zadati kroz nultu vrednost referentnog potencijala na jednom izvodu i vrednost električne struje koja protiče kroz površinu drugog izvoda u opsegu 0,1 A do 15 A. Parametri termičkih uslova opterećenja su određeni konvekcijom načinom hlađenja prekidača preko slobodnih površina kućišta i izvoda. Simulacijama je obuhvaćen rad prekidača u vertikalnom položaju u vazduhu čija je referentna temperatura 300 K, dok je za određivanje vremena odziva prekidača, kao što je navedeno u potpoglavlju 4.1.1, kao okolni fluid uzeto silikonsko ulje. Vrednost koeficijenta konvekcije je smatrana konstantnom na celoj razmatranoj površini [120], a uključena je njena zavisnost od oblika i dimenzija površine, parametara okružujućeg fluida, kao i temperaturne razlike površine i okolne sredine. Konkretna vrednost koeficijenta konvekcije h je računata na osnovu izraza [121]:

$$h = \frac{Nuk}{H}, \quad (6.1)$$

gde je k koeficijent termičke provodnosti okolnog fluida, a Nu takozvani *Nusselt*-ov broj razmatrane površine visine H , koji je dat relacijom:

$$Nu = 0,59Ra^{0,25}. \quad (6.2)$$

Za cilindrične površine izvoda čiji je prečnik D korekcija zbog uskosti izvoda je uključena množenjem dobijene vrednosti Nu korekcionim faktorom za vazduh f_a i silikonsko ulje f_s :

$$f_a = 1 + 1,446 \left[Gr^{-0,25} \left(\frac{H}{D} \right) \right]^{0,904}, \quad (6.3)$$

$$f_s = 1 + 0,141 \left[Gr^{-0,25} \left(\frac{H}{D} \right) \right]. \quad (6.4)$$

U izrazu (6.2) Ra predstavlja *Rayleigh*-ov broj koji zavisi od koeficijenta termičkog širenja fluida β , njegove termičke difuzivnosti α i kinematske viskoznosti ν , kao i temperaturne razlike razmatrane površine i okolnog fluida $\Delta T = T - T_O$ na osnovu izraza:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}. \quad (6.5)$$

Sličnu zavisnost ima u izrazima (6.3) i (6.4) *Grashof*-ov broj:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2}, \quad (6.6)$$

gde je g ubrzanje Zemljine teže.

Pri razmatranju vazduha kao okolnog fluida uzeta je u obzir zavisnost njegovih osnovnih parametara od temperature i vrednosti koje su uvršćene u simulaciju su date u tabeli 6.3. S obzirom da koeficijent konvekcije zavisi od više činilaca, teorijske vrednosti često zahtevaju korekcije na osnovu eksperimentalnih pokazatelja. Simulacija projektovanih termičkih prekidača je izvršena uz korekciju teorijske vrednosti koeficijenta konvekcije za vazduh kao okolni fluid za konstantnu vrednost od $+10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ova vrednost je definisana na osnovu eksperimentalnih podataka koji će detaljnije biti prikazani u glavi 7.

Drugi razmatrani okolni fluid je silikonsko ulje DOW CORNING 210H [123] koje se koristi u uljanim kupatilima. Njegovi parametri su smatrani temperaturno nezavisnim i imaju vrednosti: $k = 0,11 \text{ W/mK}$, $\alpha = 8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, $\beta = 9 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$, $\nu = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

| T(°C) | $k(\text{W/mK})$ | $\alpha(\text{m}^2/\text{s})$ | $\beta(1/\text{K})$ | $\nu(\text{m}^2/\text{s})$ |
|-------|------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------------|
| 0 | 0,0243 | $1,8700 \cdot 10^{-5}$ | $3,67 \cdot 10^{-3}$ | $1,330 \cdot 10^{-5}$ |
| 20 | 0,0257 | $2,1222 \cdot 10^{-5}$ | $3,43 \cdot 10^{-3}$ | $1,511 \cdot 10^{-5}$ |
| 40 | 0,0271 | $2,3927 \cdot 10^{-5}$ | $3,20 \cdot 10^{-3}$ | $1,697 \cdot 10^{-5}$ |
| 60 | 0,0285 | $2,6472 \cdot 10^{-5}$ | $3,00 \cdot 10^{-3}$ | $1,890 \cdot 10^{-5}$ |
| 80 | 0,0299 | $2,9633 \cdot 10^{-5}$ | $2,83 \cdot 10^{-3}$ | $2,094 \cdot 10^{-5}$ |
| 100 | 0,0314 | $3,2896 \cdot 10^{-5}$ | $2,68 \cdot 10^{-3}$ | $2,306 \cdot 10^{-5}$ |
| 120 | 0,0328 | $3,6057 \cdot 10^{-5}$ | $2,55 \cdot 10^{-3}$ | $2,523 \cdot 10^{-5}$ |
| 140 | 0,0343 | $3,9649 \cdot 10^{-5}$ | $2,43 \cdot 10^{-3}$ | $2,755 \cdot 10^{-5}$ |
| 160 | 0,0358 | $4,3192 \cdot 10^{-5}$ | $2,32 \cdot 10^{-3}$ | $2,985 \cdot 10^{-5}$ |
| 180 | 0,0372 | $4,6726 \cdot 10^{-5}$ | $2,21 \cdot 10^{-3}$ | $3,229 \cdot 10^{-5}$ |
| 200 | 0,0386 | $5,0431 \cdot 10^{-5}$ | $2,11 \cdot 10^{-3}$ | $3,463 \cdot 10^{-5}$ |

Tabela 6.3: Osnovni parametri vazduha na različitim temperaturama [122].

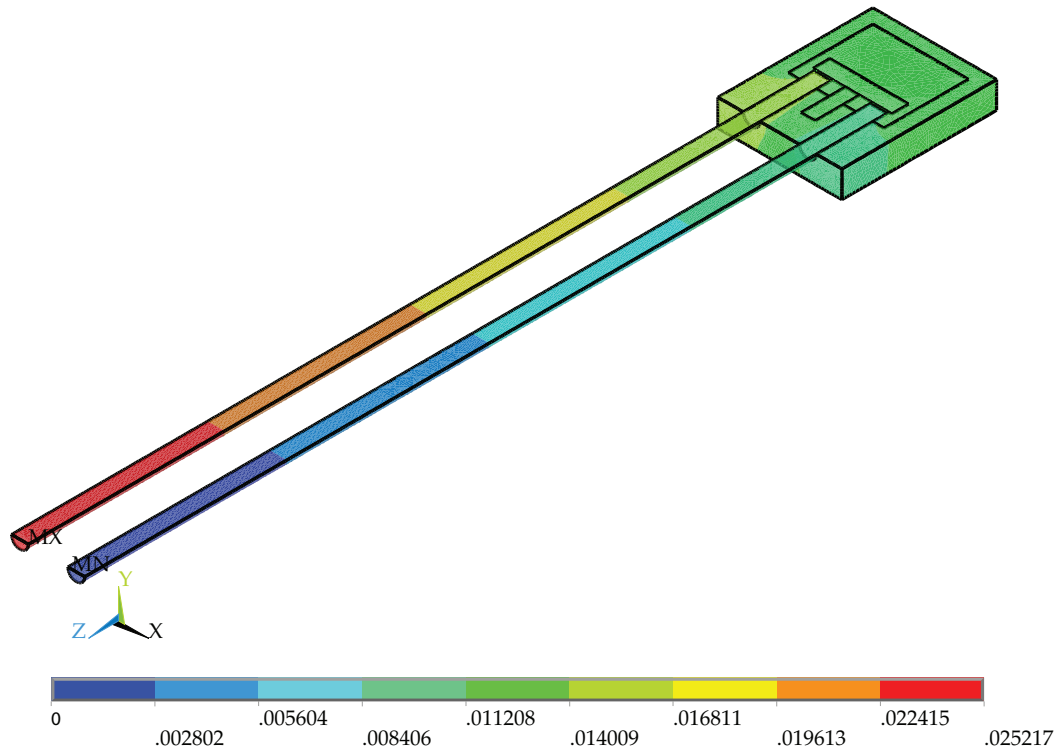
6.3 Raspodele električnih i termičkih veličina unutar termičkih prekidača

Simulacijom termičkih prekidača u 3–D domenu pri raznovrsnim radnim uslovima dobijene su raspodele različitih električnih i termičkih veličina unutar prekidača. Od primarnog interesa je raspodela temperature, dok raspodele gustine struje i električnog potencijala omogućavaju bolje sagledavanje uticaja geometrije i dimenzija elemenata prekidača u postupcima njihove optimizacije.

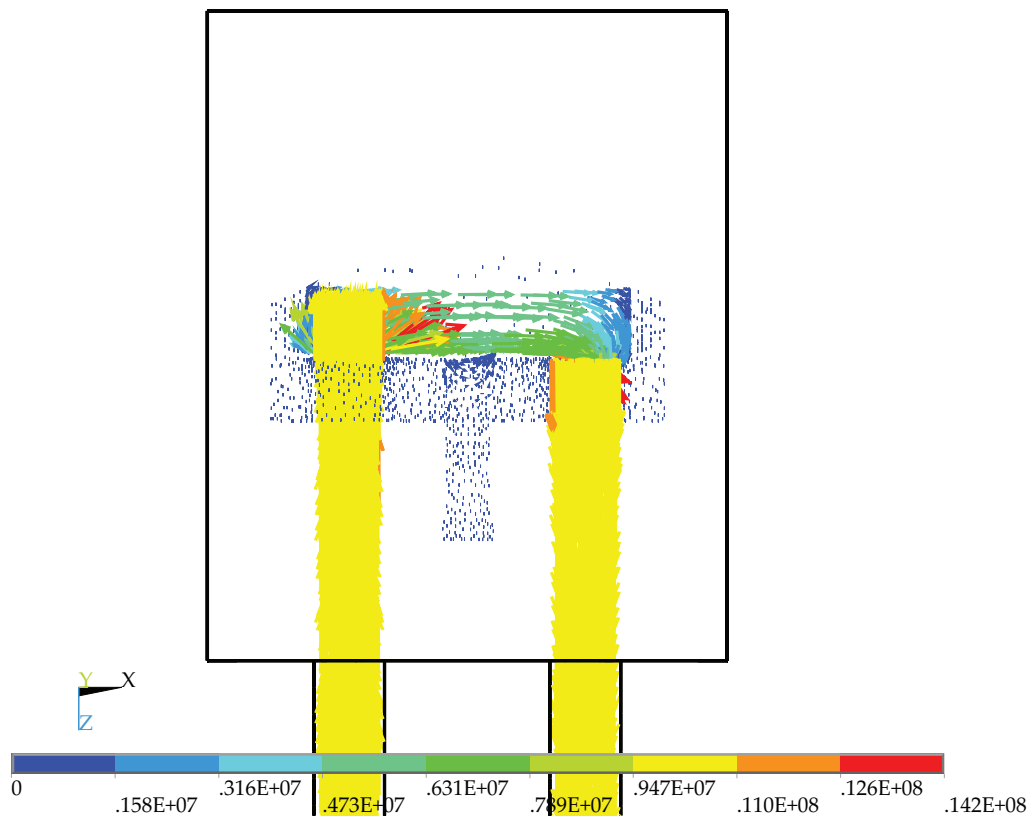
Raspodela električnog potencijala u termičkom prekidaču tipa S–95 osnovne projektovane konstrukcije pri proticanju nominalne struje od 12 A i temperaturi okoline od 300 K preko 10^6 ciklusa kontaktiranja je prikazana na slici 6.2. Uočljiva je ravnomerna raspodela električnog potencijala sa opsegom vrednosti do 25 mV u odnosu na referentni nulti potencijal. Na osnovu ove zavisnosti određuje se i električna otpornost provodnog dela prekidača i kod ovog tipa ona iznosi 2,1 m Ω . Istovetna raspodela električnog potencijala postoji i kod termičkih prekidača tipa S–138, s tim što je usled više električne provodnosti primenjene legure maksimalna vrednost električnog potencijala 24 mV i njoj odgovara otpornost provodnog dela od 2 m Ω .

Vektorska prezentacija raspodele gustine struje u termičkom prekidaču tipa S–95 osnovne projektovane konstrukcije pri struji od 12 A i temperaturi okoline od 300 K je prikazana na slici 6.3. Maksimalna vrednost gustine struje postoji na spoju lemnih listova i provodne trake i iznosi $1,4 \cdot 10^7$ A/m². Kvalitativno i kvantitativno ista raspodela se dobija za prekidač tipa S–138. Oblasti maksimalne gustine struje ujedno su i oblasti maksimalnog zagrevanja usled *Joule*–ovog efekta. Izrazito niža termička provodnost makrolona i vazduha u odnosu na provodne elemente uslovljava nagomilavanje toplote u okolini lemnih listova. Sa druge strane, usled visoke termičke provodnosti izvoda, provodne trake i lemnih listova toplota se kroz ove elemente efikasno raspodeljuje i oslobađa putem konvekcije sa slobodnih površina izvoda. Na taj način se ostvaruje raspodela temperature prikazana na slici 6.4 za prekidače tipa S–95 i slici 6.5 za prekidače tipa S–138.

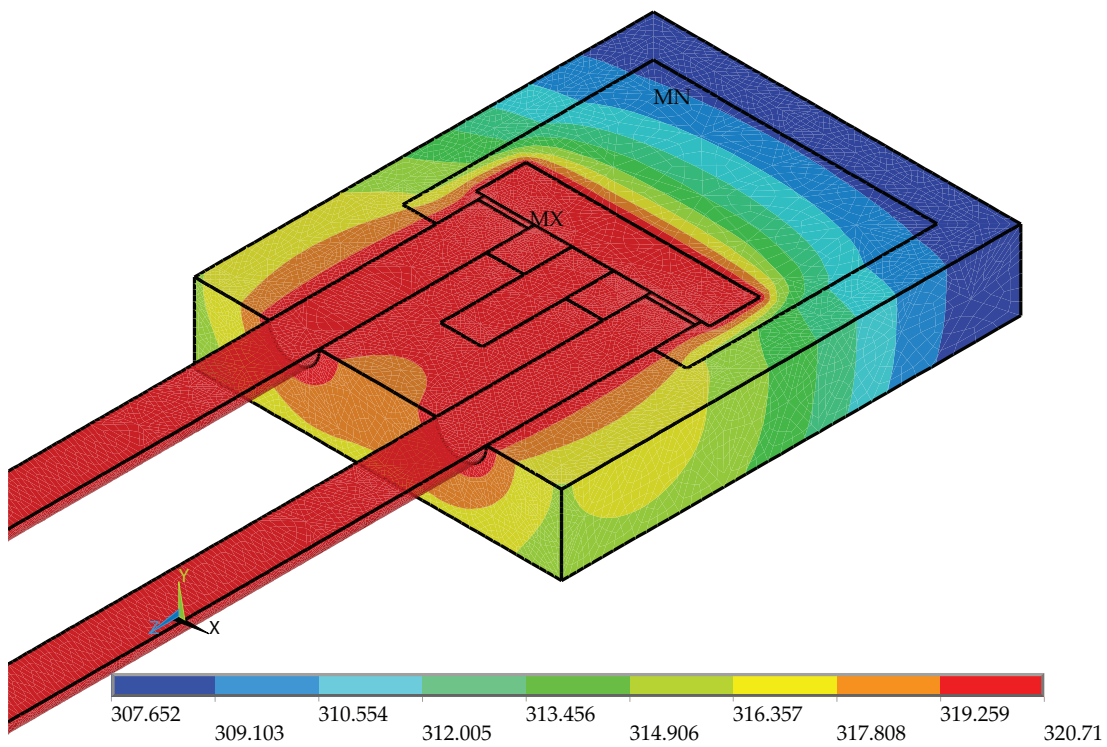
Kao i u slučaju raspodele gustine struje, maksimalna vrednost temperature postoji na spoju lemnih listova i provodne trake, dok raspon temperature u provodnim delovima prekidača nije širok i iznosi 1,5 K. Kvalitativne raspodele kod oba tipa prekidača



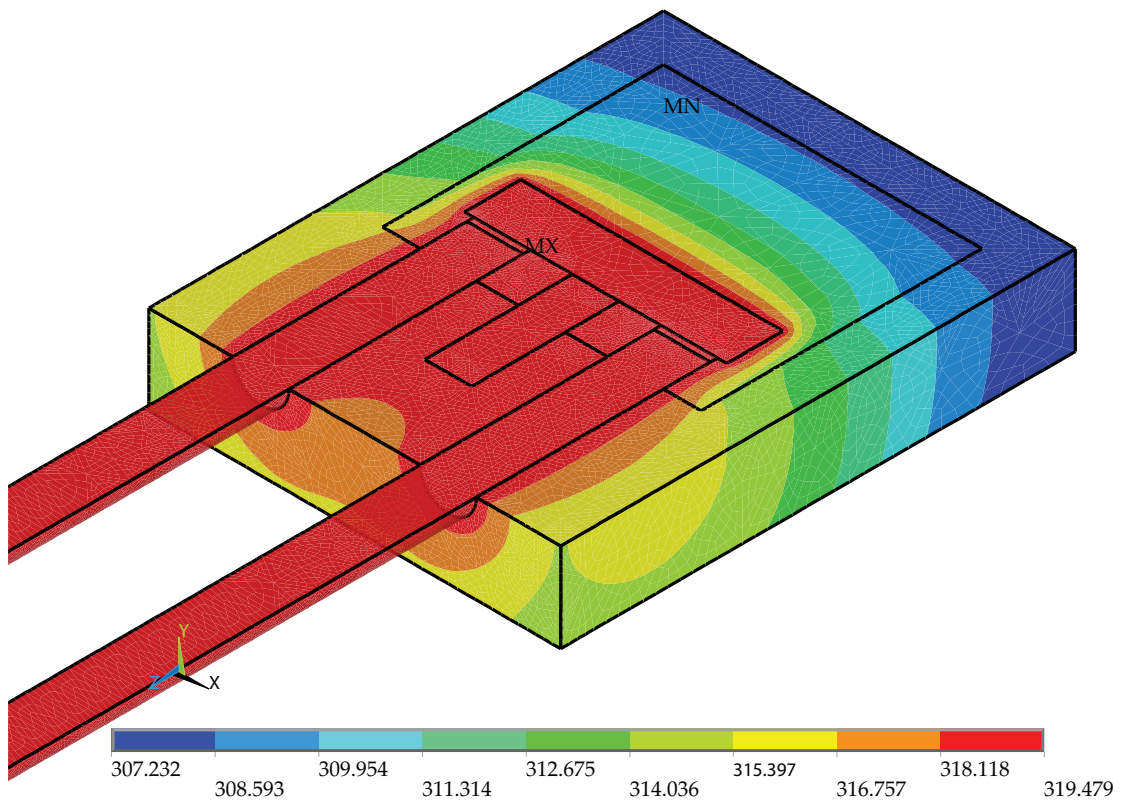
Slika 6.2: Raspodela električnog potencijala u termičkom prekidaču tipa S-95 pri proticanju nominalne struje od 12 A i temperaturi okoline od 300 K.



Slika 6.3: Raspodela gustine struje u vektorskom obliku u termičkom prekidaču tipa S-95 pri proticanju struje od 12 A i temperaturi okoline od 300 K.



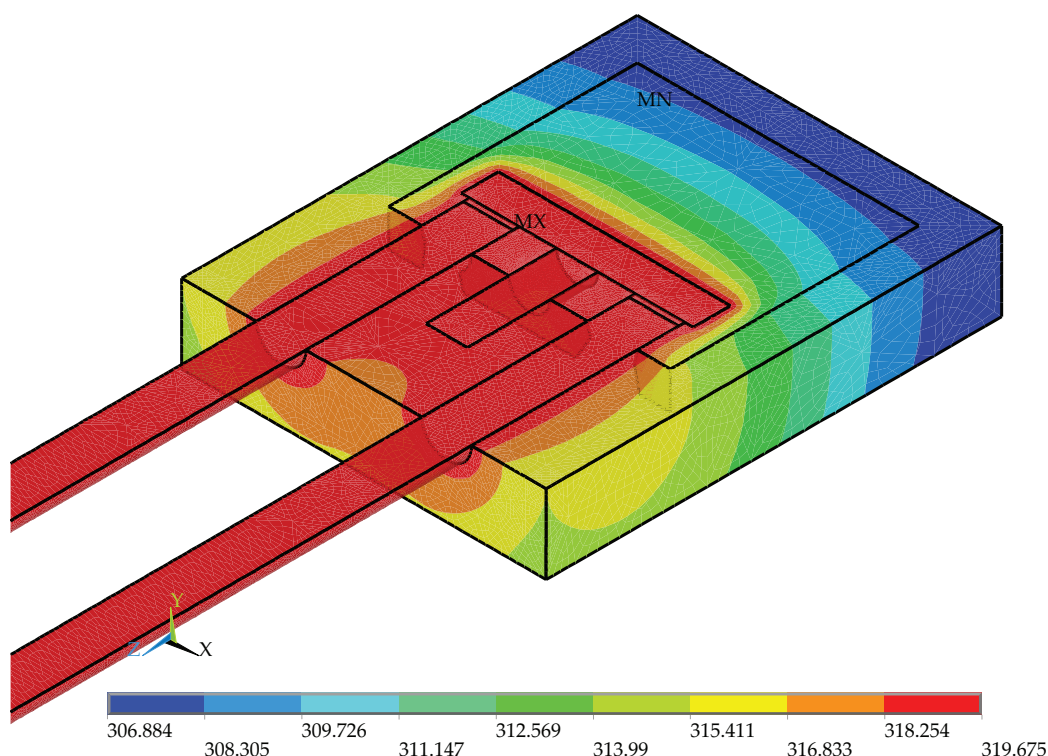
Slika 6.4: Raspodela temperature u termičkom prekidaču tipa S-95 pri proticanju struje od 12 A i temperaturi okoline od 300 K.



Slika 6.5: Raspodela temperature u termičkom prekidaču tipa S-138 pri proticanju struje od 12 A i temperaturi okoline od 300 K.

su jednake, dok se maksimalne vrednosti temperature malo razlikuju usled razlike u provodnim karakteristikama primenjenih legura.

Imajući u vidu da se na osnovu temperaturne raspodele određuju termički parametri neophodni za specificiranje radnih uslova, kao i parametri funkcionalnosti termičkih prekidača od interesa je poznavanje ovih raspodela pri različitim projektovanim konstrukcijama i dimenzijama pojedinih elemenata. Na slikama 6.6 i 6.7 su prikazane raspodele temperature u termičkom prekidaču tipa S-138 pri proticanju nominalne struje od 12 A i temperaturi od 300 K, a za smanjene debljine provodne trake od 0,9 mm odnosno 0,6 mm.

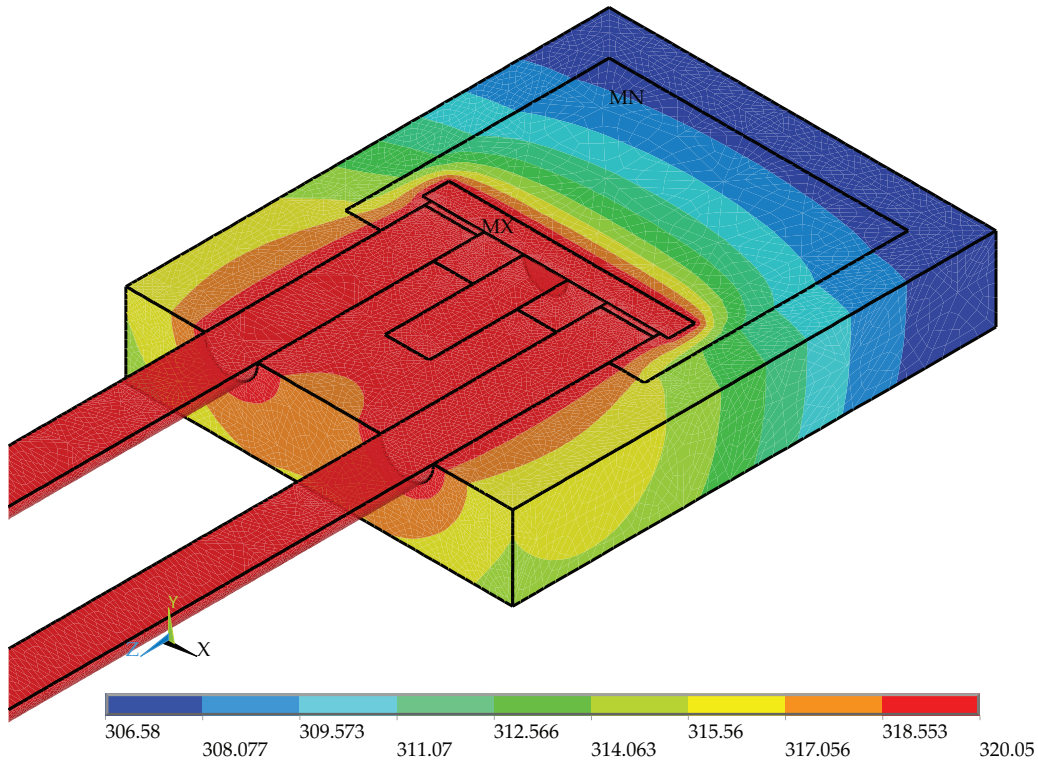


Slika 6.6: Raspodela temperature u termičkom prekidaču tipa S-138 pri proticanju nominalne struje od 12 A i temperaturi okoline od 300 K za debljinu provodne trake od 0,9 mm.

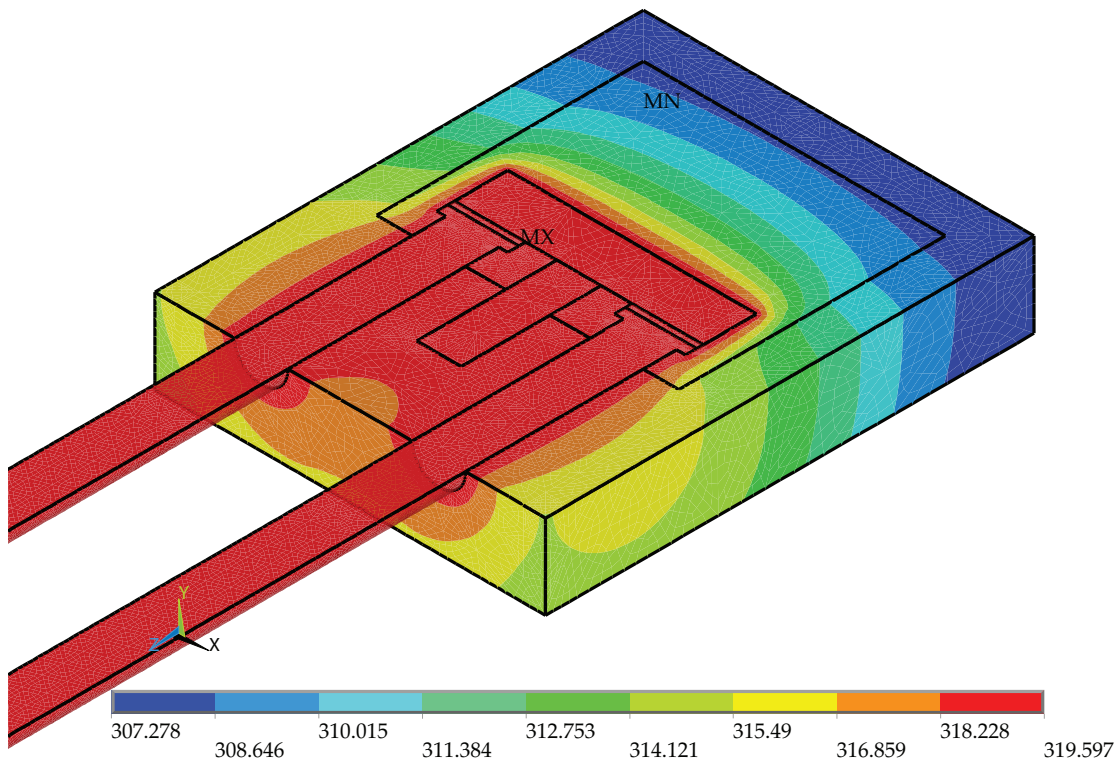
U odnosu na raspodelu sa slike 6.5, koja se odnosi na debljinu provodne trake od 1,2 mm, sa ovih slika se uočava ista raspodela uz nešto izmenjene maksimalne vrednosti. Naime, maksimalnih 319,5 K u osnovnoj realizaciji, postaje 319,7 K za debljinu trake od 0,9mm, odnosno 320 K za debljinu od 0,6 mm.

S obzirom da je temperatura na lemnim listovima uslovljena vrednošću gustine struje koja kroz izvode preko lemnih listova teče kroz provodnu traku, ispitivan je uticaj oblika kontaktnih glava izvoda na raspodelu temperature u prekidačima. Ravan oblik kontaktnih glava je zamenjen zakovičastim, pri čemu su formirane cilindrične kontaktne glave dimenzija navedenih u tabeli 4.1 i prečnici lemnih listova adekvatno prilagođeni. Zakovičasti oblik kontaktnih glava obezbeđuje bolju mehaničku stabilnost lemnih spojeva. Raspodela temperature u termičkom prekidaču tipa S-95 pri proticanju nominalne struje od 12 A i temperaturi okoline od 300 K je prikazana na slici 6.8.

Poređenjem prikazane raspodele sa raspodelom u termičkom prekidaču sa ravnom kontaktnom glavom (slika 6.4) uočava se smanjenje maksimalne temperature za oko



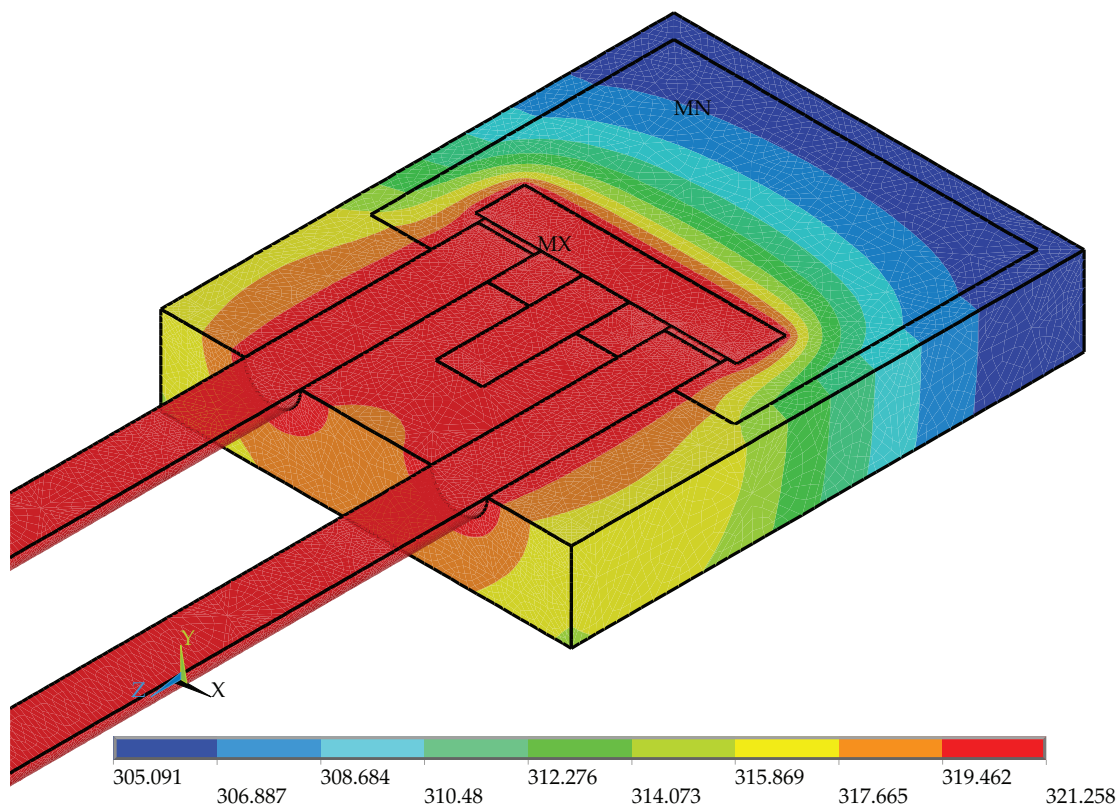
Slika 6.7: Raspodela temperature u termičkom prekidaču tipa S-138 pri proticanju nominalne struje od 12 A i temperaturi okoline od 300 K za debljinu provodne trake od 0,6 mm.



Slika 6.8: Raspodela temperature u termičkom prekidaču tipa S-95 sa zakovičastom kontaktnom glavom pri proticanju nominalne struje od 12 A i temperaturi okoline od 300 K.

1 K. Kod prekidača tipa S-138 navedena modifikacija utiče na smanjenje maksimalne temperature za oko 0,5 K.

Termičke karakteristike kućišta prekidača prvenstveno su određene koeficijentom termičke provodnosti materijala od koga je izrađeno, ali i njegovom geometrijom i dimenzijama. Sa ciljem ispitivanja uticaja debljine zidova kućišta na temperaturne karakteristike prekidača, generisana je raspodela temperature za slučaj smanjene debljine zidova sa osnovnih 1 mm na 0,5 mm, pri napred navedenim radnim uslovima i prikazana na slici 6.9.



Slika 6.9: Raspodela temperature u termičkom prekidaču tipa S-95 sa smanjenom debljinom zidova kućišta pri proticanju nominalne struje od 12 A i temperaturi okoline od 300 K.

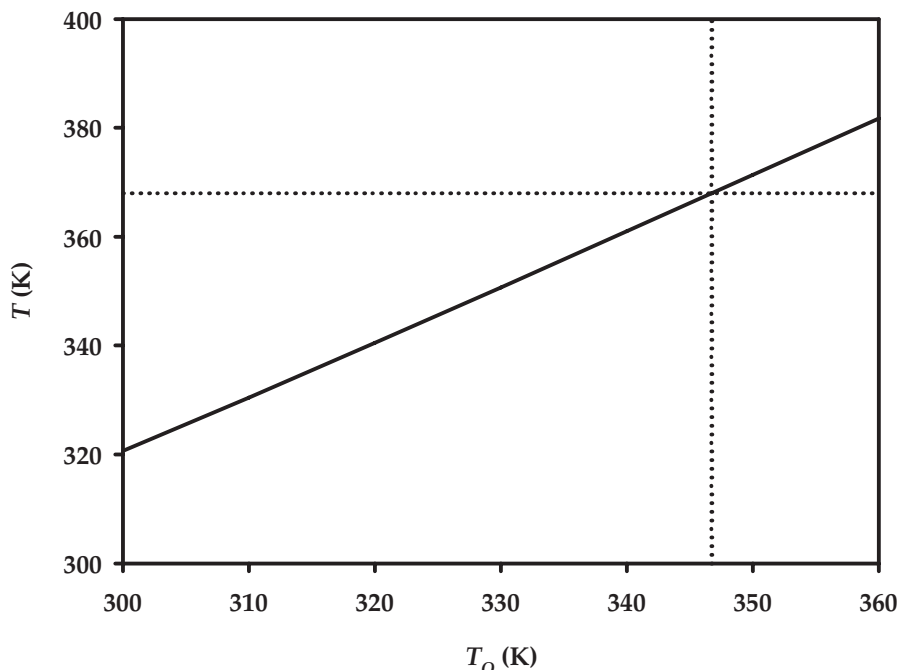
Opseg temperaturne raspodele u ovom slučaju je proširen u odnosu na standardnu konstrukciju prikazanu na slici 6.4, pri čemu je vrednost maksimalne temperature koja postoji na lemnim listovima povećana za 0,5 K dok je vrednost minimalne temperature (na spoljnoj strani kućišta) za 2,5 K niža. Ovakva raspodela se objašnjava povećanim udelom vazduha i smanjenim udelom makrolona u odvođenju generisane toplote sa provodnih delova. Naime, termička provodnost vazduha je 10 puta manja od makrolona, a konvekcioni uslovi hlađenja u oba slučaja su nepromenjeni.

6.4 Određivanje temperaturnih parametara funkcionalnosti i kvaliteta termičkih prekidača

Uspešna implementacija termičkih prekidača se zasniva na detaljnom poznavanju električnih radnih uslova i željene temperature na kojoj prekid strujnog kola uređaja

čija se zaštita očekuje treba da nastane. Električne radne uslove određuju vrednosti primenjene struje i napona, dok temperatura prekidanja definiše nominalnu radnu temperaturu, temperaturu držanja i vreme odziva.

Sa ciljem određivanja temperature držanja prekidača generisane su zavisnosti temperature na lemnim listovima od temperature okoline pri nominalnoj vrednosti primenjene struje i prikazane na slici 6.10 za prekidače tipa S-95, odnosno slici 6.11 za prekidače tipa S-138 osnovne konstrukcije.

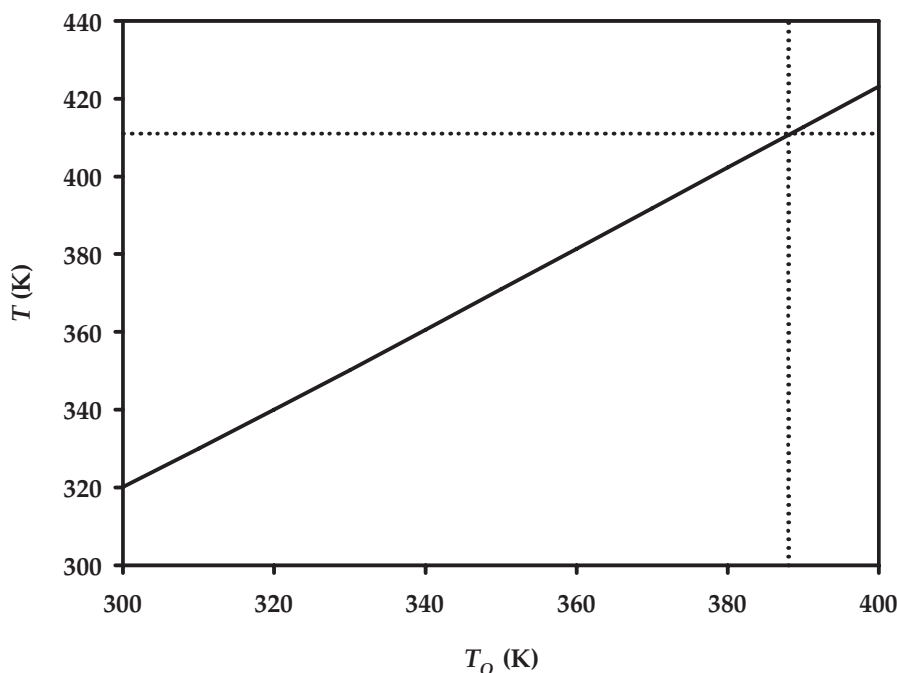


Slika 6.10: Zavisnost temperature na lemnim listovima od temperature okoline pri nominalnoj vrednosti primenjene struje za prekidač tipa S-95.

Vrednost temperature držanja određuje se kao temperatura okoline pri kojoj se na lemnim listovima dostiže temperatura prekidanja i za prekidač tipa S-95 ona iznosi 347 K (74 °C), dok za tip S-138 iznosi 388 K (115 °C).

Uslovi određivanja nominalne radne temperature zahtevaju dovođenje prekidača do temperature 20 K ispod temperature prekidanja i naknadno lagano povišenje temperature okoline za 1 K/min. Na ovaj način se postiže potpuna termička ravnoteža između prekidača i okoline. Temperatura okoline pri kojoj se na lemnim listovima dostiže temperatura prekidanja predstavlja nominalnu radnu temperaturu. Ovakvi uslovi zahtevaju simulaciju sa vremenski promenljivim graničnim uslovima i rezultati su prikazani na slici 6.12 za termičke prekidače tipa S-95 i slici 6.13 za termičke prekidače tipa S-138. Nominalne radne temperature određene na osnovu prikazanih zavisnosti su 1 K iznad temperatura prekidanja ($T_F=369$ K za tip S-95 i $T_F=412$ K za tip S-138), usled visokih termičkih provodnosti elemenata prekidača.

Poređenje kvaliteta termičkih prekidača različitih konstrukcija se često bazira na vrednostima vremena odziva. To je vreme neophodno da dođe do otvaranja prekidača nakon njihovog naglog izlaganja temperaturama iznad temperature prekidanja. Rezultati simulacije promene temperature na lemnim listovima nakon unošenja termičkih prekidača držanih na temperaturi od 300 K u silikonsko uljano kupatilo čija je temperatura za vrednost ΔT iznad temperature prekidanja su prikazani na slikama 6.14 i 6.15.



Slika 6.11: Zavisnost temperature na lemnim listovima od temperature okoline pri nominalnoj vrednosti primenjene struje za prekidač tipa S-138.

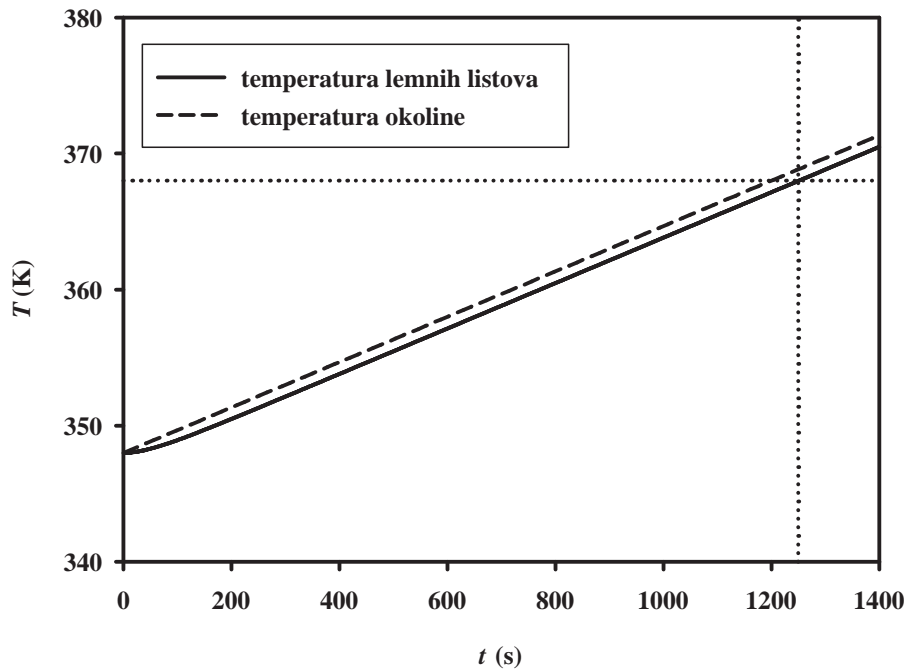
Vremena odziva određena na osnovu ovih krivih su prikazana na slici 6.16 za oba tipa prekidača. Uočljiva je izrazita zavisnost od vrednosti temperature prekidanja i temperature silikonskog ulja. Za prekidač tipa S-95 vreme odziva se kreće u intervalu od 20 do 40 s, dok je kod tipa S-138 ovaj opseg 30–60 s. Kao što je navedeno u potpoglavlju 4.1.1, ove vrednosti se koriste jedino za kvalitativnu verifikaciju prekidača, ali ne i za konkretno specificiranje vremena neophodnog da dođe do prekida strujnog kola.

6.5 Optimizacija geometrije i dimenzija termičkih prekidača

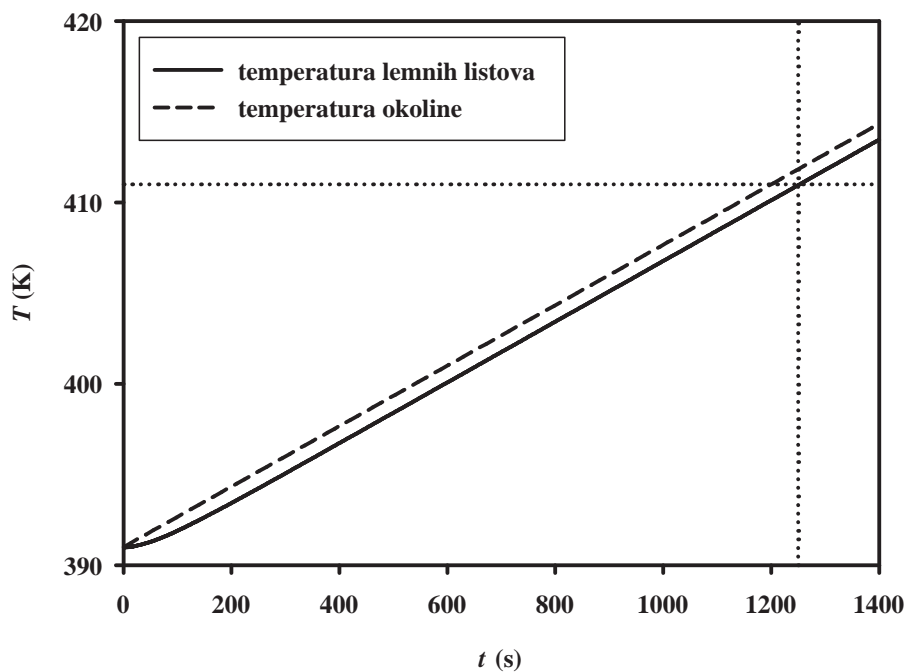
Optimizacija geometrije i dimenzija termičkih prekidača je izvršena razmatranjem uticaja debljine provodne trake, oblika kontaktnih glava izvoda i debljine zidova kućišta na osnovne temperaturne parametre funkcionalnosti i pokazatelje kvaliteta prekidača. Pri izboru optimalne konstrukcije sagledavani su funkcionalni, ekonomski i tehnološki aspekti.

Porast temperature na lemnim spojevima usled *Joule*-ovog efekta predstavlja veličinu koja daje najlakši uvid u uticaj pojedinih konstrukcionih parametara na funkcionalnost termičkih prekidača. Prva analiza je ostvarena za promenu debljine provodne trake prekidača sa osnovnih 1,2 mm na 0,9 mm i 0,6 mm. Na osnovu raspodela sa slika 6.4 – 6.7 dobijene su zavisnosti temperature na lemnim listovima od primenjene struje pri različitim debljinama provodne trake i temperaturi okoline od 300 K i prikazane na slikama 6.17 i 6.18 za termičke prekidače tipa S-95 i tipa S-138, respektivno.

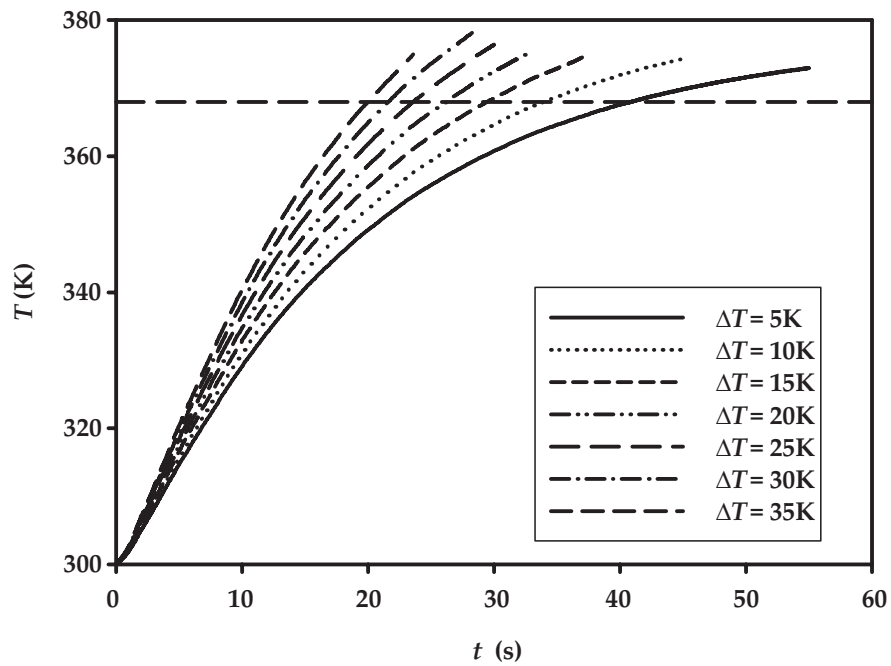
Sa ovih slika su uočljive identične zavisnosti kod oba tipa prekidača uz nešto niže vrednosti kod tipa S-138 usled više provodnosti primenjene legure. Takođe se uočava da smanjenje debljine provodne trake na 0,9 mm ne utiče na porast temperature, dok je za debljinu od 0,6 mm on nešto uvećan.



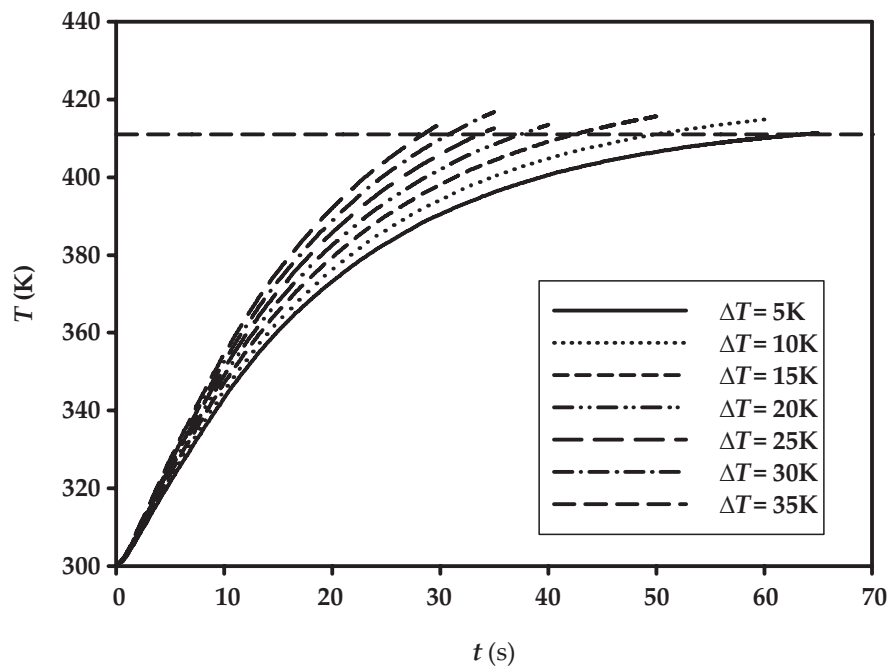
Slika 6.12: Zavisnost promene temperature na lemnim listovima pri promeni temperature okoline kod prekidača tipa S-95.



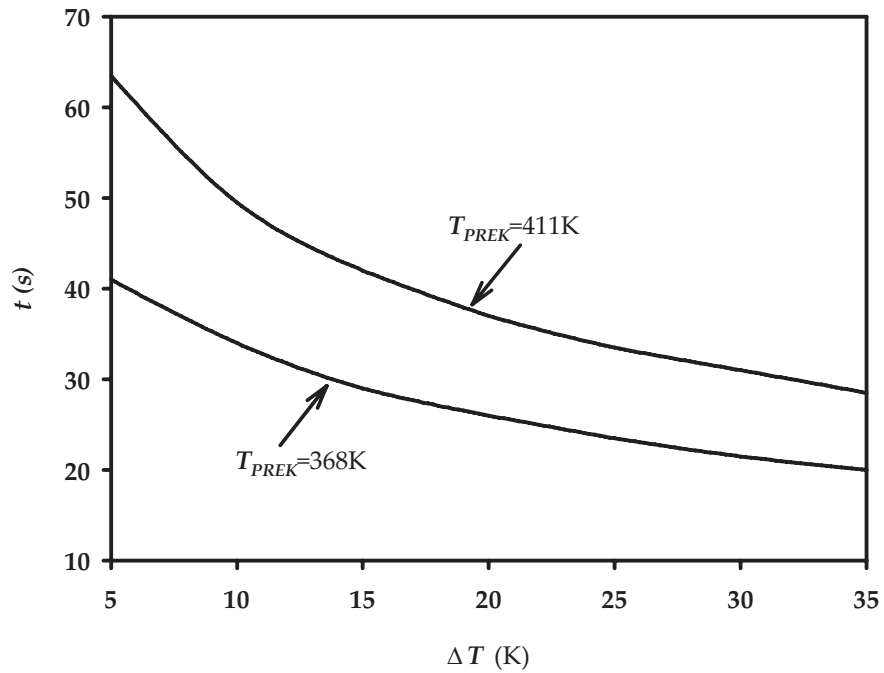
Slika 6.13: Zavisnost temperature na lemnim listovima pri promeni temperature okoline kod prekidača tipa S-138.



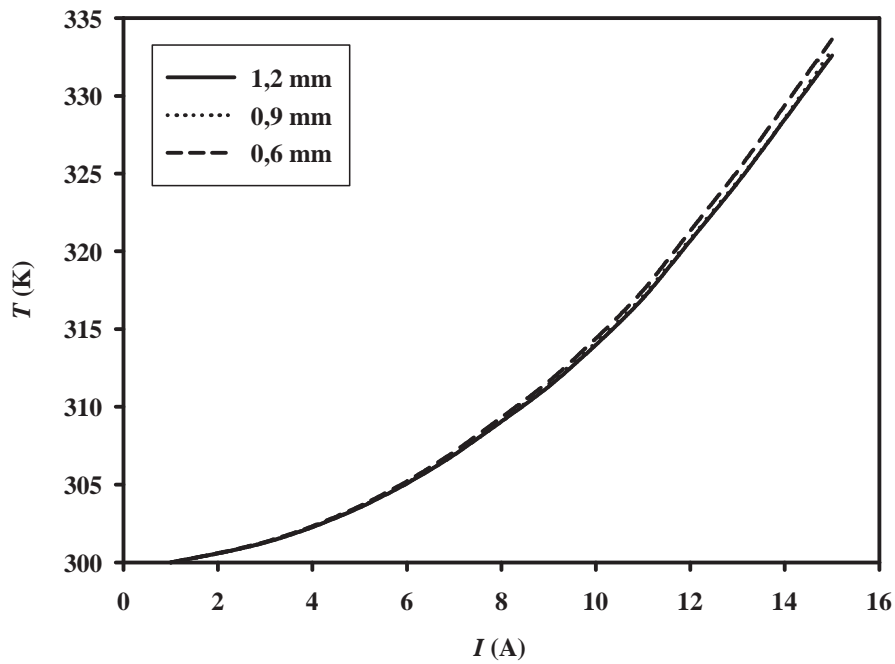
Slika 6.14: Promene temperature na lemnim listovima sa vremenom u prekidaču tipa S-95 za različite temperature silikonskog ulja.



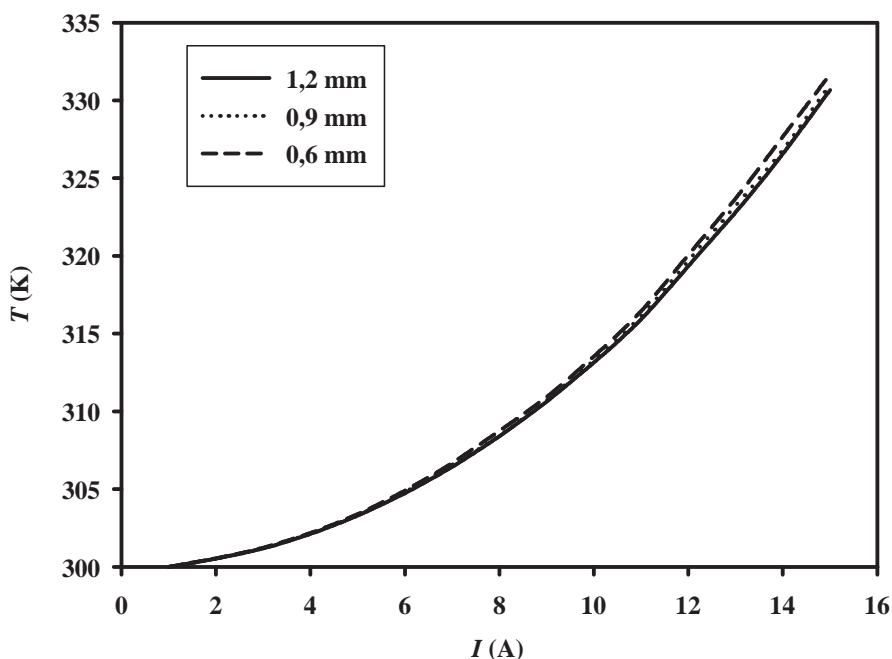
Slika 6.15: Promene temperature na lemnim listovima sa vremenom u prekidaču tipa S-138 za različite temperature silikonskog ulja.



Slika 6.16: Vreme odziva termičkih prekidača.



Slika 6.17: Zavisnosti temperature na lemnim listovima od primenjene struje pri različitim debljinama provodne trake i temperaturi okoline od 300 K za prekidač tipa S-95.



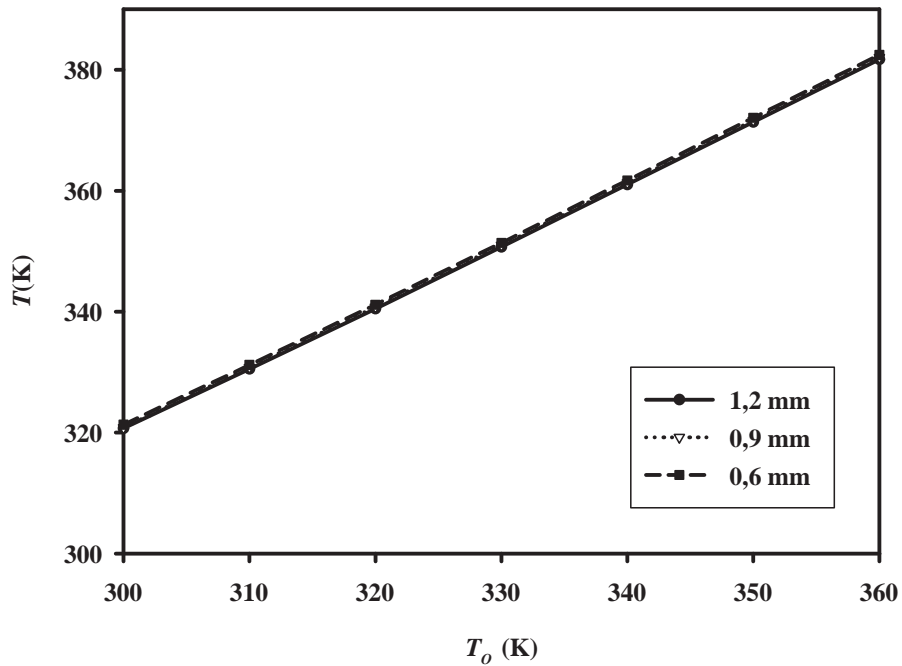
Slika 6.18: Zavisnosti temperature na lemnim listovima od primenjene struje pri različitim debljinama provodne trake i temperaturi okoline od 300 K za prekidač tipa S-138.

Zavisnosti temperature na lemnim listovima od temperature okoline za nominalnu vrednost struje, prikazane na slikama 6.19 i 6.20 za prekidač tipa S-95, odnosno tipa S-138, ukazuju da se temperatura držanja kod oba tipa ne menja sa izmenom debljine provodne trake. Na osnovu navedenih razmatranja zaključuje se da je smanjenje debljine provodne trake na 0,9 mm opravdano, s obzirom da karakteristike prekidača ostaju neizmenjene, pri čemu se obezbeđuju bolje proizvodne mogućnosti i manji utrošak materijala.

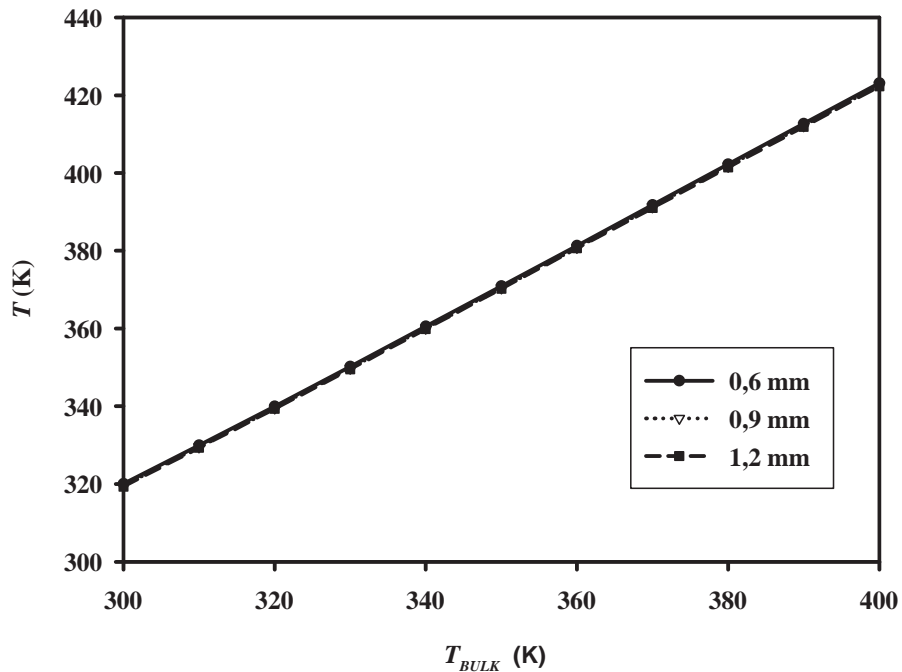
U drugoj analizi razmatrane su kontaktne glave izvoda zakovičastog oblika. Porast temperature usled elektro-termičkih efekata za ravan i zakovičast oblik kontaktnih glava izvoda je prikazan na slikama 6.21 i 6.22. Prikazane zavisnosti ukazuju na smanjen porast temperature kod zakovičastog oblika i to za vrednost od 1 K kod tipa S-95 (slika 6.8) i 0,5 K kod tipa S-138 pri nominalnoj vrednosti struje. Međutim, ova poboljšanja su minimalna, tako da modifikacija početno projektovane konstrukcije nije opravdana jer zahteva dodatne proizvodne korake.

U poglavlju 6.3 je prikazan uticaj smanjenja debljine zidova kućišta na raspodelu temperature u termičkom prekidaču. Postojeće minimalno povećanje temperature na lemnim spojevima pri nominalnoj vrednosti struje i temperaturi okoline od 300 K ne utiče na promenu vrednosti nominalne radne temperature razmatranih prekidača. Takođe, rezultati simulacije su pokazali da smanjenje debljine zidova kućišta ne utiče na promenu vremena odziva prekidača. Nameće se zaključak da je veća vrednost debljine zidova kućišta poželjna, s obzirom da se njom obezbeđuju bolje mehaničke karakteristike prekidača.

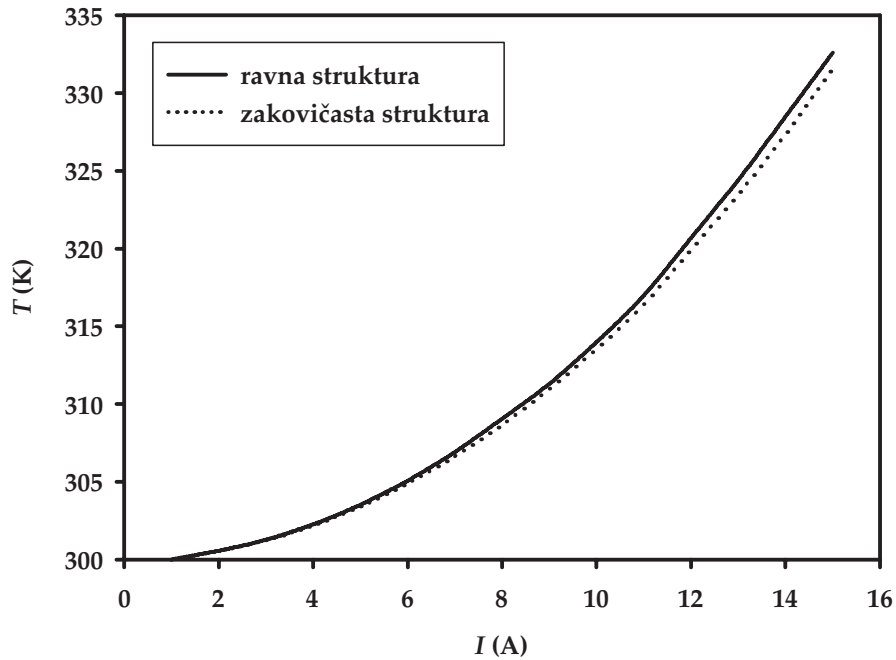
Na osnovu navedenih rezultata termički prekidači optimalne geometrije i dimenzija kod oba tipa podrazumevaju izvode sa ravnim kontaktnim glavama, debljinu provodne trake od 0,9 mm i debljinu zidova kućišta od 1 mm.



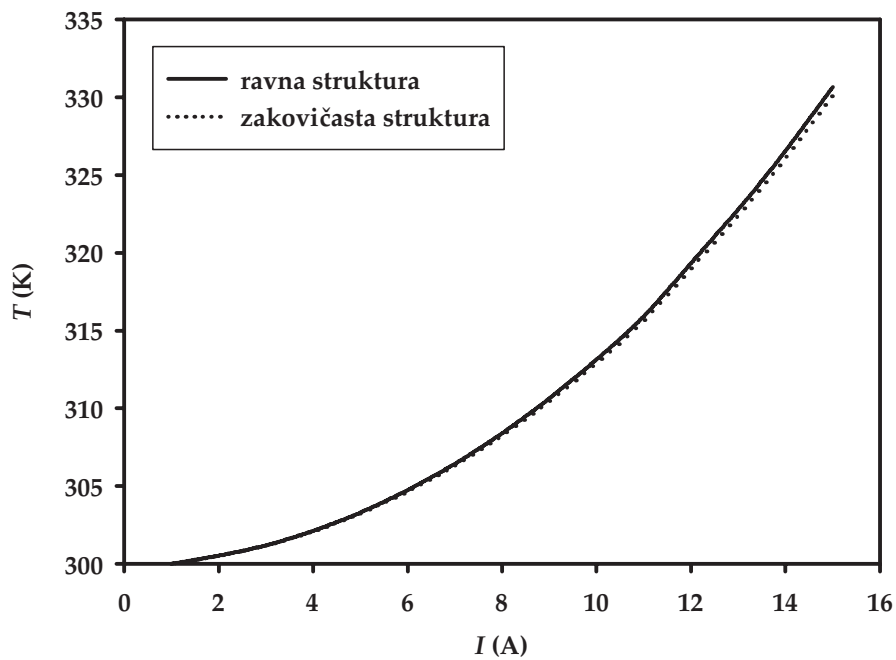
Slika 6.19: Zavisnosti temperature na lemnim listovima od temperature okoline pri različitim debljinama provodne trake i nominalnoj vrednosti struje za prekidač tipa S-95.



Slika 6.20: Zavisnosti temperature na lemnim listovima od temperature okoline pri različitim debljinama provodne trake i nominalnoj vrednosti struje za prekidač tipa S-138.



Slika 6.21: Zavisnosti temperature na lemnim listovima od temperature okoline pri različitim oblicima kontaktne glave i nominalnoj vrednosti struje za prekidač tipa S-95.



Slika 6.22: Zavisnosti temperature na lemnim listovima od temperature okoline pri različitim oblicima kontaktne glave i nominalnoj vrednosti struje za prekidač tipa S-138.

Glava 7

Temperaturni parametri funkcionalnosti i kvaliteta termičkih prekidača tipa S-138

Osnovni temperaturni parametri funkcionalnosti i kvaliteta termičkih prekidača vezuju se za vrednosti nominalne radne temperature (ekvivalent je temperatura prekidanja), porast temperature usled elektro-termičkih efekata i vreme odziva komponente, kao što je naznačeno u potpoglavlju 4.1.1. Pri tome se vreme odziva termičkih prekidača kao parametar kvaliteta navodi za specificirane laboratorijske radne uslove. Realna primena termičkih prekidača uključuje raznovrsne načine njihove ugradnje i vrednosti toplote generisane spoljnim putem, tako da se vremena odziva navode uz preciziranje radnih uslova komponente. Poznavanje raspodele temperature na elementima prekidača pri proticanju definisanih struja i određenim uslovima zagrevanja omogućava određivanje navedenih temperaturnih parametara, kao i razmatranje termičkih karakteristika pojedinih elemenata.

Sagledavanjem temperaturnih raspodela izvršena je funkcionalna i kvalitativna analiza termičkog prekidača tipa S-138 realizovanog kao prototip na osnovu rezultata opisanih u glavi 6. Temperatura prekidanja ovog termičkog prekidača je 138 °C (411 K), nominalni napon 250 V i nominalna struja 12 A. Razmatrana je osnovna konstrukcija prekidača dimenzija navedenih u tabeli 6.1. Snimanje temperaturnih raspodela unutar prekidača je izvršeno primenom termovizijskog metoda kroz dve merne postavke.

7.1 Termovizijski merni metod

Primenjeni merni metod se bazira na korišćenju termovizijske kamere za beskontaktno merenje temperature, regulisanog izvora toplote i promenljivog izvora struje. Termovizijska kamera Varioscans 3021ST firme Jenoptik iz Nemačke je skenirajući termovizijski merni sistem visoke rezolucije namenjen detekciji infracrvenog zračenja u oblasti spektra talasnih dužina od 8 μm do 12 μm . Signal iz infracrvenog spektra se pojačava, 16-to bitno digitalizuje i preslikava u oblast vidljivog spektra sa rezolucijom od 256 boja. Svaka boja na prikazanom termovizijskom snimku predstavlja određeni opseg temperature [124]. Rezolucija sistema Varioscans iznosi 0,03 °C, a opseg merenja temperature od -40 °C do +1200 °C. Takođe, postoji mogućnost beleženja temperaturnih raspodela u određenom vremenskom opsegu, sa pogodno definisanim korakom. Ovakav način rada kamere omogućava formiranje vremenskog video zapisa tempera-

turnih promena u razmatranim strukturama. Diferencni mod rada kamere dozvoljava izdvajanje detalja koji sadrže samo promenu temperature u dva sukcesivna zapisa [125].

Prednosti termovizijske kamere pri beskontaktnom merenju temperature se ogledaju u njenoj kompaktnosti, mobilnosti, lakom rukovanju i malom utrošku energije. Jasno i tačno definisan termogram, visok kvalitet slike, linearna temperaturna skala uz objedinjeni kontrolni softver omogućavaju jednostavnu interpretaciju rezultata preko odgovarajućih izveštaja. Takođe, upotrebom termovizijske kamere eliminiše se korišćenje skupih i usko specijalizovanih komora za regulaciju temperature.

Prvom mernom postavkom je pri konstantnoj temperaturi okoline kroz termički prekidač propuššana struja promenljive vrednosti i termovizijski praćena promena temperature u okolini lemnih spojeva. Struja je zadavana u diskretnim vrednostima, preko promenljivog izvora, pri čemu je za svaku vrednost očitavana temperatura nakon uspostavljanja ustaljenog režima. Primenom struje iznad nominalne vrednosti prekidač je doveden u otvoreno stanje usled efekta samozagrevanja. Prekidač se nalazio u vertikalnom položaju i omogućeno je njegovo hlađenje putem konvekcije sa slobodnih površina kućišta i provodnog mosta. Prikaz korišćene merne aparature je dat na slici 7.1.



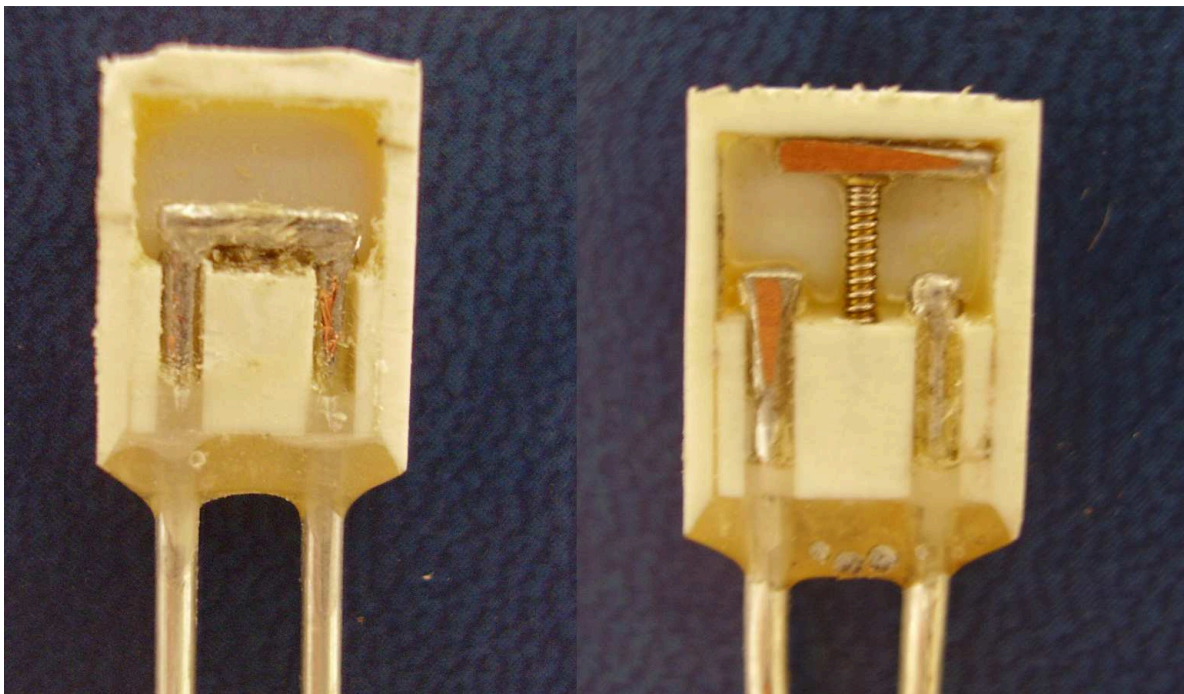
Slika 7.1: Prikaz termovizijskog mernog metoda sa kontrolisanom strujom.

Pri definisanju parametara funkcionalnosti i kvaliteta termičkih prekidača obično se podrazumeva njihovo uniformno izlaganje povišenoj temperaturi. U realnim uslovima termički prekidač je najčešće izložen značajnijem zagrevanju sa jedne strane u odnosu na ostale delove. Pri tome je ograničeno i odvođenje toplote sa njegovih slobodnih površina. Ovakvi radni uslovi se najčešće sreću pri zaštiti namotaja snažnih motora ili transformatora od pregrevanja, gde termoprekidač naleže na namotaje. Iz tih razloga je u drugoj mernoj postavci menjana temperatura kojoj je izložen prekidač kontinualnim zagrevanjem jedne strane njegovog kućišta bez primene električne struje. Kao regulisani izvor toplote korišćena je struja toplog vazduha usmerena na termoploču od pertinaksa debljine 3mm sa čije je druge strane postavljen ispitivani termički prekidač. Gradijent porasta temperature dela termoploče regulisan je promenom rastojanja između ploče i izvora toplog vazduha ili regulacijom brzine strujanja toplog vazduha. Ovakvim jednostavnim i jeftinim sistemom moguće je postići regulisanu promenu temperature termoploče do maksimalne vrednosti od 600 K. Termovizijskom kamerom je snimana raspodela temperature na elementima prekidača u intervalima od 3 s do njegovog otvaranja. Prikaz merne postavke je dat na slici 7.2.

U obe merne postavke uzorci su pripremljeni tako što im je uklonjen deo kućišta (slika 7.3(a)), te je unutrašnjost termičkog prekidača bila dostupna snimanju termovizijskom kamerom.



Slika 7.2: Prikaz termovizijskog mernog metoda sa kontrolisanim izvorom toplote.



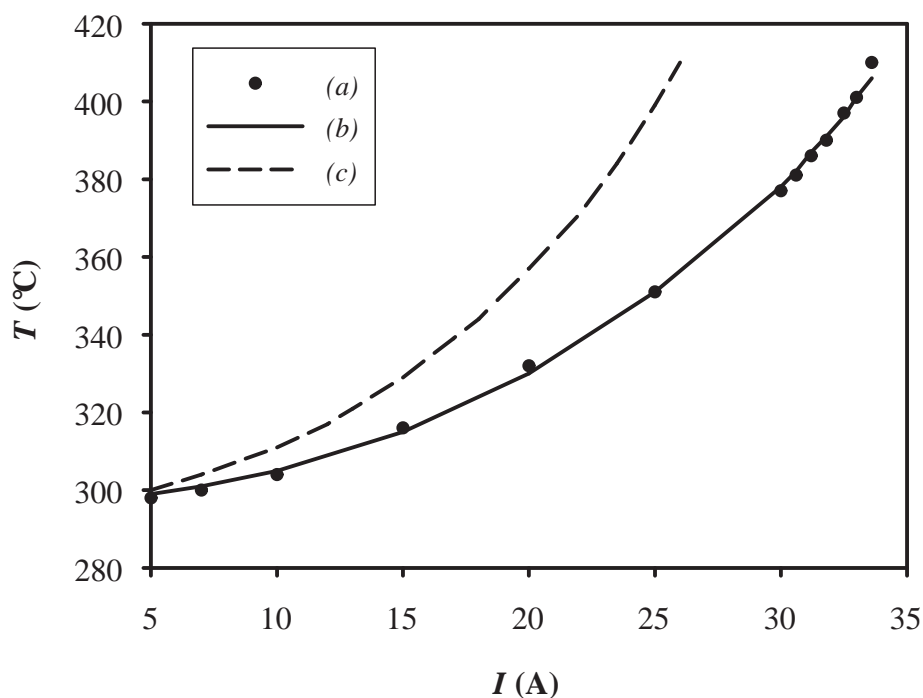
(a)

(b)

Slika 7.3: Uzorci termičkih prekidača pre (a) i nakon (b) otvaranja.

7.2 Porast temperature usled elektro–termičkih efekata

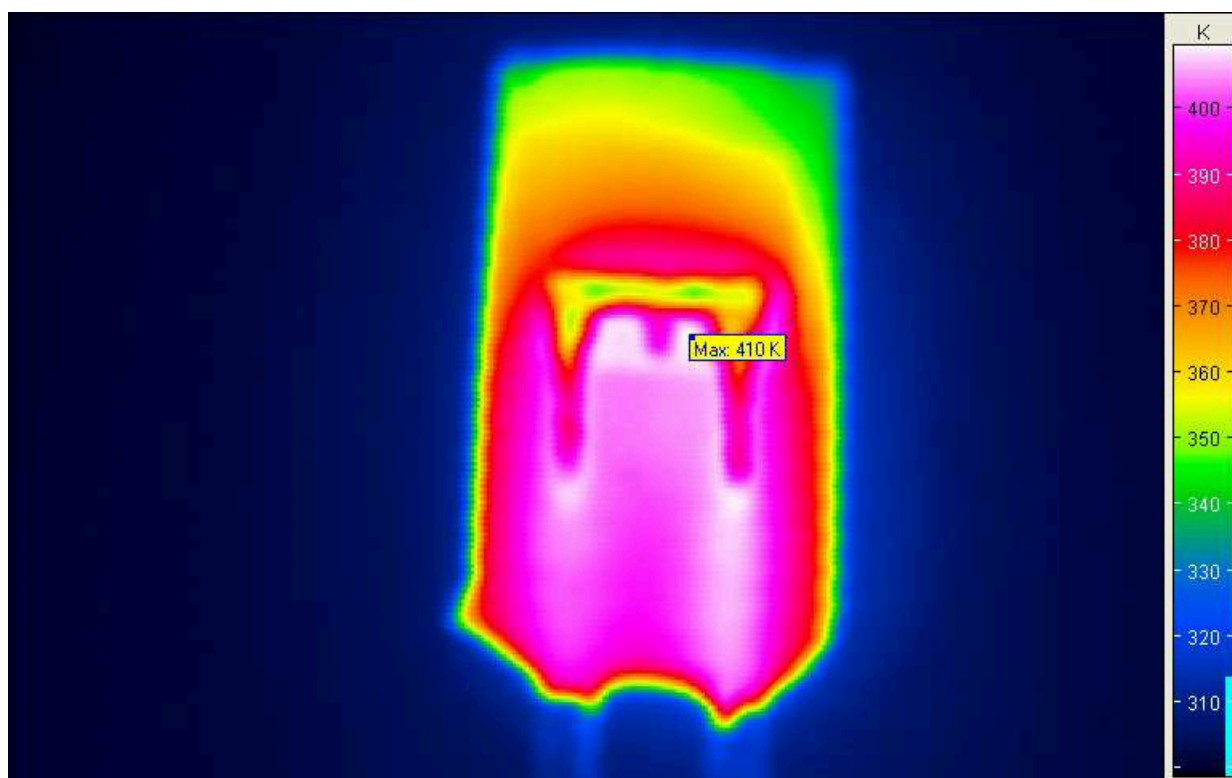
Kao rezultat izvođenja prve merne postavke razmatrana je promena radne temperature aktivnog dela prekidača usled elektro–termičkih efekata pri konstantnoj temperaturi okoline od 297 K. Zavisnost radne temperature od primenjene struje prikazana je na slici 7.4.



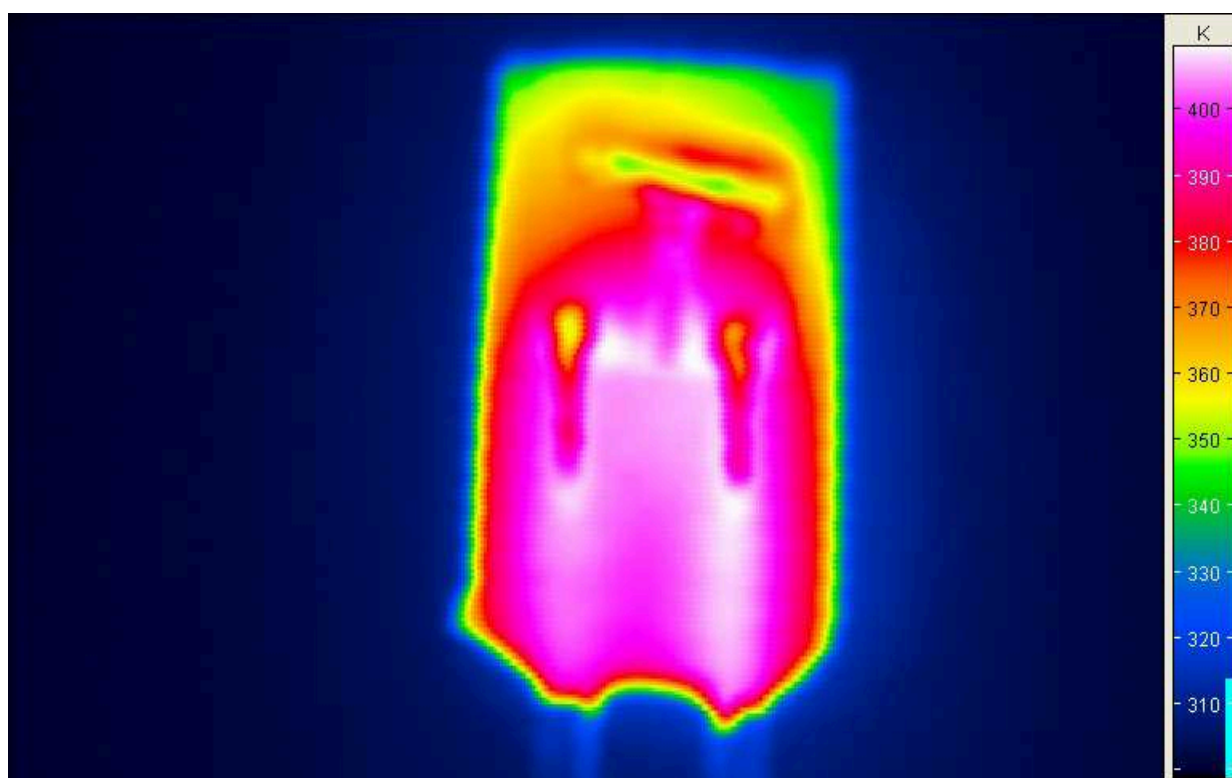
Slika 7.4: Zavisnost temperature na lemnim listovima od primenjene struje: (a) eksperiment, (b) simulacija – odstranjen deo kućišta, (c) simulacija – realni radni uslovi.

Sa ove slike je uočljiva standardna eksponencijalna zavisnost, uz konstataciju da je za nominalnih 12 A porast radne temperature u odnosu na temperaturu okoline 12 K. Za primenjenu struju od 33,6 A došlo je do otvaranja prekidača i time je definisana vrednost struje prekidanja. Raspodela temperature u prekidaču za ove radne uslove neposredno pre i nakon otvaranja je prikazana na slici 7.5. Na osnovu ovih snimaka je određena vrednost temperature prekidanja ispitivanog termičkog prekidača od 410 K.

Zavisnost temperature na lemnim listovima od primenjene struje sa slike 7.4 je iskorišćena za preciziranje graničnih uslova u postupku simulacije termičkih i električnih parametara termoprekidača. Naime, kao što je detaljnije obrađeno u glavi 6, postupak projektovanja i optimizacije termičkih prekidača zahteva simulaciju ovih komponenata pri različitim radnim uslovima. Pravilno odabrana vrednost koeficijenta konvekcije na slobodnim površinama prekidača od presudnog je značaja za dobijanje korektnih rezultata simulacije. S obzirom da vrednost ovog koeficijenta zavisi od oblika i orijentacije površine, kao i fizičkih i termičkih osobina i temperature okolne sredine, teorijski određene vrednosti često zahtevaju korekcije na osnovu eksperimentalnih pokazatelja. Za slučaj razmatranih termoprekidača teorijske vrednosti koeficijenta konvekcije za vazduh kao okolni fluid su korigovane za konstantnu vrednost od $10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ovako dobijena vrednost je iskorišćena pri simulaciji prekidača za uslove definisane predstavljenom mer-



(a)



(b)

Slika 7.5: Raspodele temperature u termičkom prekidaču pri proticanju struje od 33,6 A neposredno pre (a) i nakon (b) otvaranja.

nom postavkom i dobijena zavisnost temperature na lemnim listovima od primenjene struje je takođe prikazana na slici 7.4.

Ovde treba napomenuti da je za realizaciju termovizijskog snimanja temperaturnih raspodela bilo neophodno omogućiti vizuelni pristup unutrašnjosti prekidača odstranjivanjem dela kućišta, čime su izmenjeni realni termički uslovi njegovog hlađenja. Koeficijent konvekcije je određen imajući u vidu ove granične uslove, a raspodela temperature u prekidaču pri nominalnoj vrednosti struje dobijena simulacijom za slučaj odstranjenog dela kućišta je prikazana na slici 7.6(a). Naknadno je izvršena simulacija termičkih prekidača pri realnim uslovima funkcionisanja (kompletno kućište) i dobijena raspodela temperature je prikazana na slici 7.6(b).

Zavisnost temperature na lemnim listovima od primenjene struje za realne radne uslove je takođe prikazana na slici 7.4. U ovom slučaju za nominalnu vrednost struje od 12 A porast radne temperature u odnosu na temperaturu okoline je 20 K. Takođe, iz rezultata simulacije se zaključuje da bi pri realnim radnim uslovima struja prekidanja imala vrednost od 26 A.

7.3 Vreme odziva

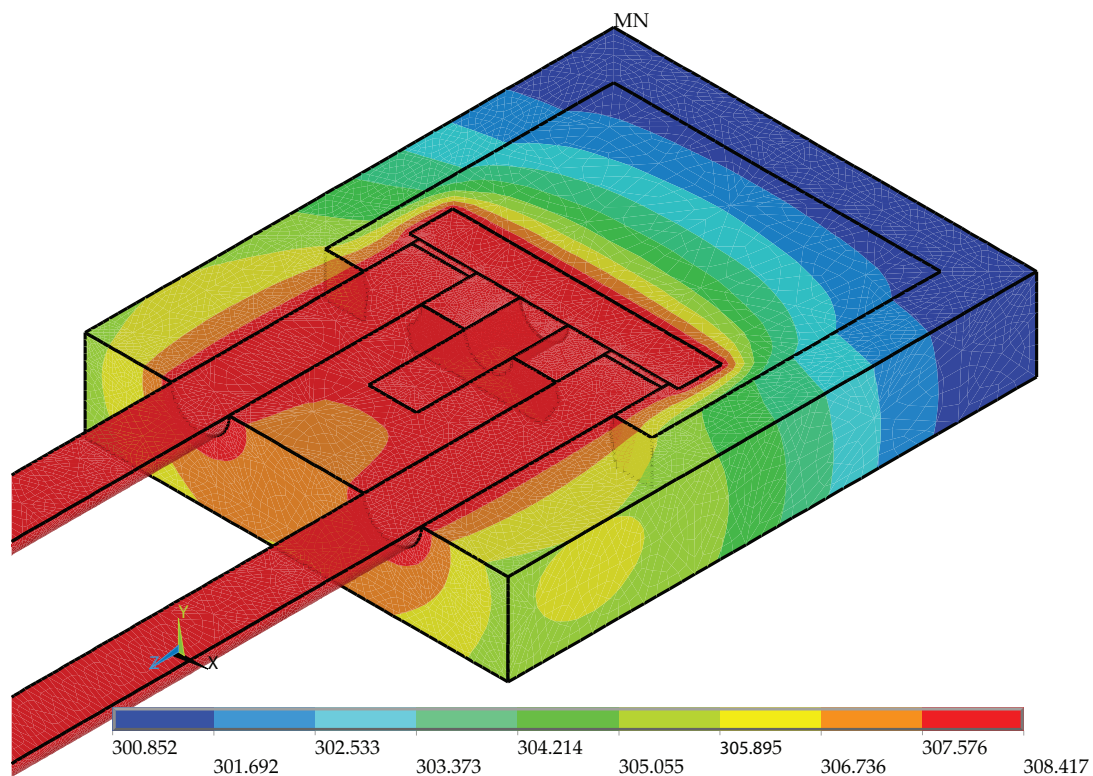
Vremenska zavisnost raspodele temperature unutar termičkih prekidača dobijena drugom mernom postavkom omogućava određivanje vremena odziva prekidača pri naglom izlaganju povišenoj temperaturi. Standardi za propisivanje kvaliteta termičkih prekidača zadaju graničnu temperaturu 35 K iznad temperature prekidanja [14]. Kao što je ranije napomenuto, vreme odziva značajno zavisi od brzine zagrevanja termičkih prekidača i mesta njihove ugradnje, tako da se kvantitativna vrednost ovog parametra vezuje za specifične radne uslove, koristi aproksimativno i služi za poređenje kvaliteta različitih tipova prekidača. Zagrevanje prekidača je vršeno kontinualno dvema različitim brzinama. Kao referentno vreme t_0 uzet je momenat kada je temperatura kojoj je termoprekidač izložen 446 K. Utvrđeno je da prekid nastaje 33 s nakon referentnog vremena pri izlaganju toplotnom fluksu od 3200 W/m^2 , odnosno pri brzini zagrevanja termoploče od $0,6 \text{ K/s}$. Raspodele temperature u termičkom prekidaču u referentnom vremenu i neposredno nakon prekidanja pri datim uslovima su prikazane na slici 7.7. Na osnovu prikazane raspodele određena je i temperatura prekidanja, koja za ovaj prekidač iznosi 411 K.

Pri izlaganju termičkog prekidača toplotnom fluksu od 1050 W/m^2 , kome odgovara brzina zagrevanja termoploče od $0,2 \text{ K/s}$, dobijene su raspodele temperatura u referentnom vremenu i nakon prekidanja prikazane na slici 7.8. U ovom slučaju određeno je vreme odziva od 100 s i temperatura prekidanja od 411 K.

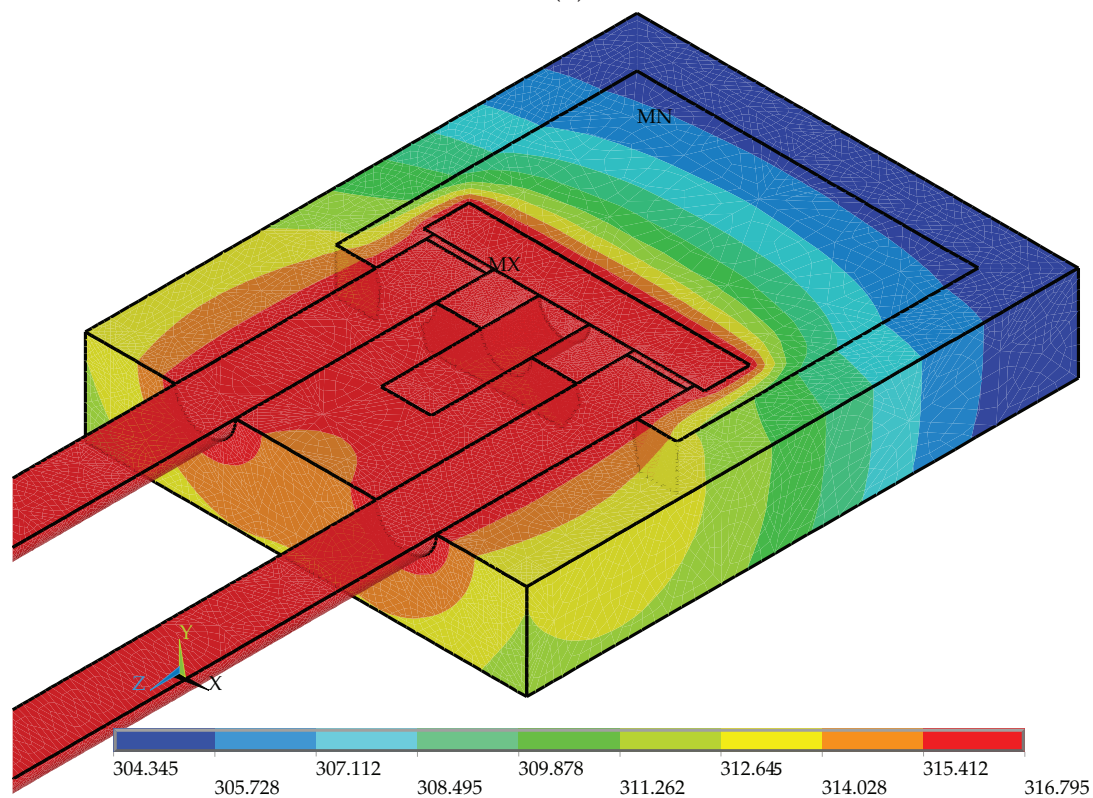
S obzirom da pri realnim radnim uslovima ne postoji direktno odvođenje toplote sa provodnih elemenata unutar kućišta, navedena vremena odziva predstavljaju gornje prihvatljive granice pri određivanju kvaliteta termoprekidača. Ova činjenica se uočava i razmatranjem rezultata simulacije prikazanih na slici 6.16, pri čemu treba napomenuti da se oni odnose na silikonsko ulje, a ne vazduh kao okolni fluid.

7.4 Temperaturene karakteristike kućišta

Kod komponenti čije se funkcionisanje zasniva na temperaturnom odzivu od interesa je poznavanje provodnih karakteristika kućišta. Stoga je analizirana termička otpornost



(a)

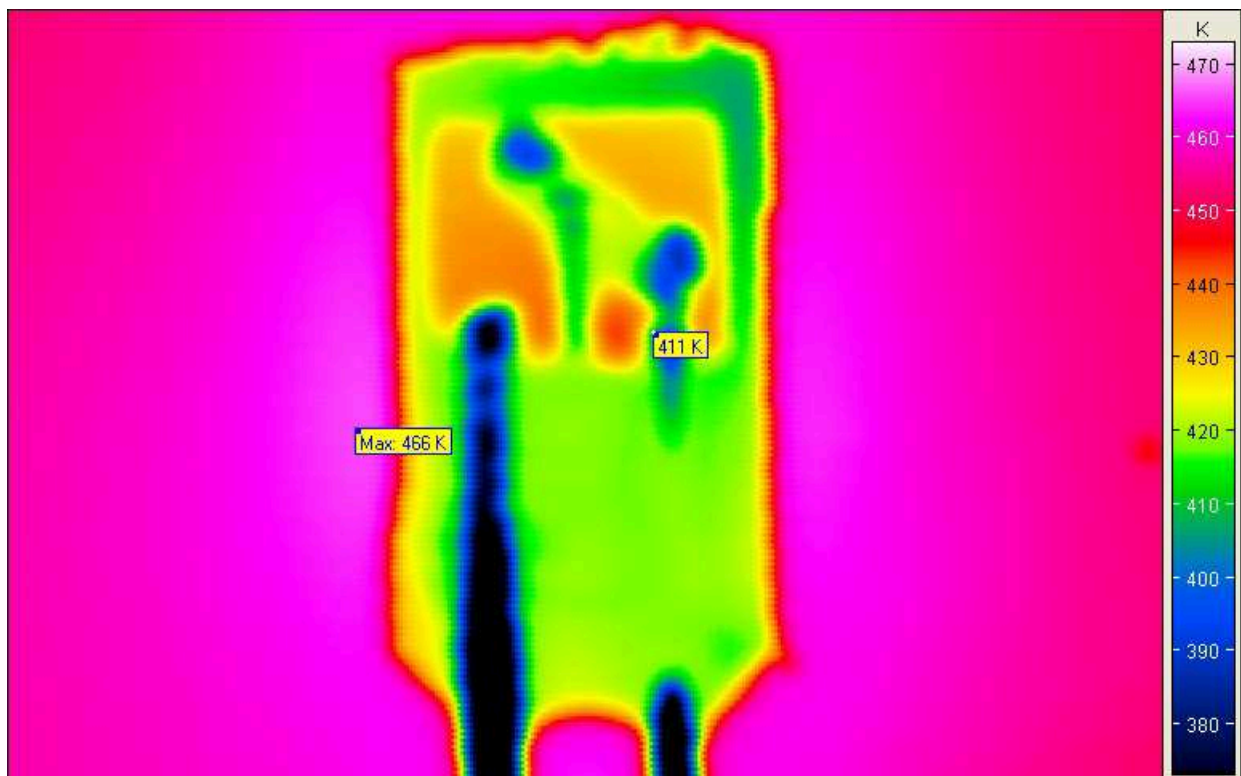


(b)

Slika 7.6: Raspodele temperature u termičkom prekidaču pri struji od 12 A dobijene simulacijom za slučaj odstranjenog dela kućišta (a) i realnih radnih uslova (b).

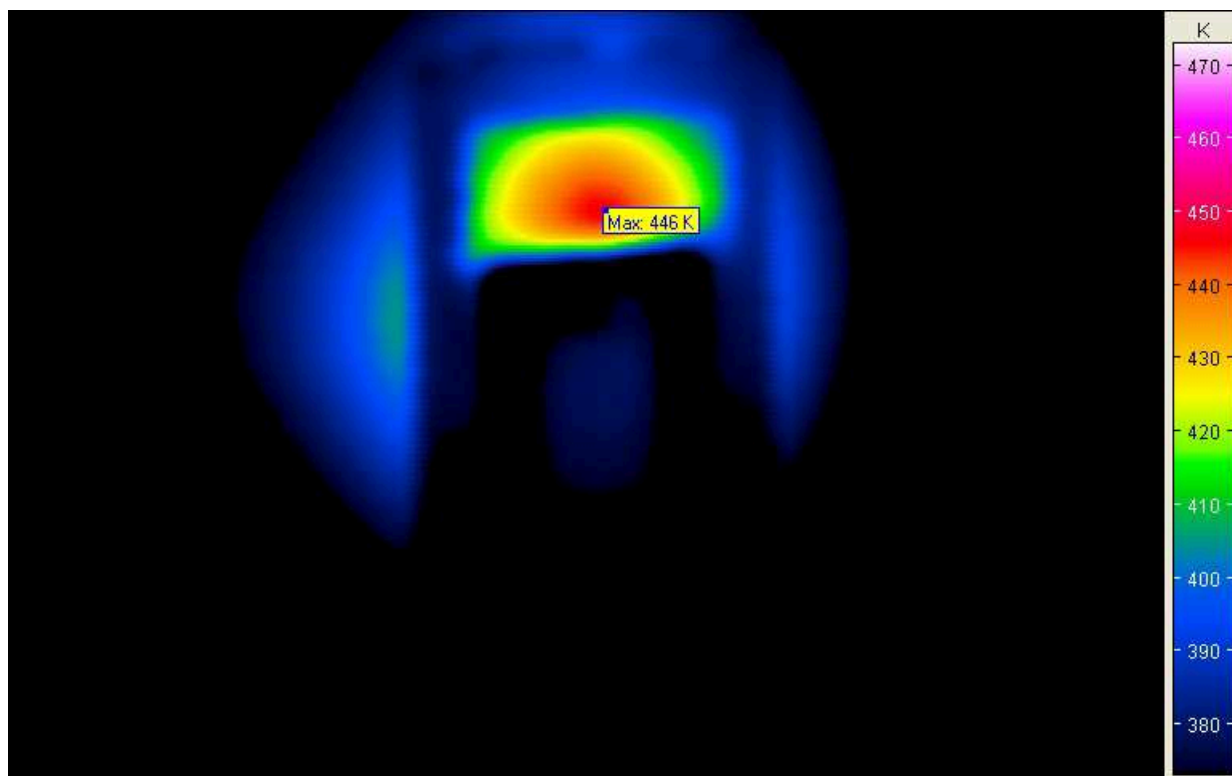


(a)

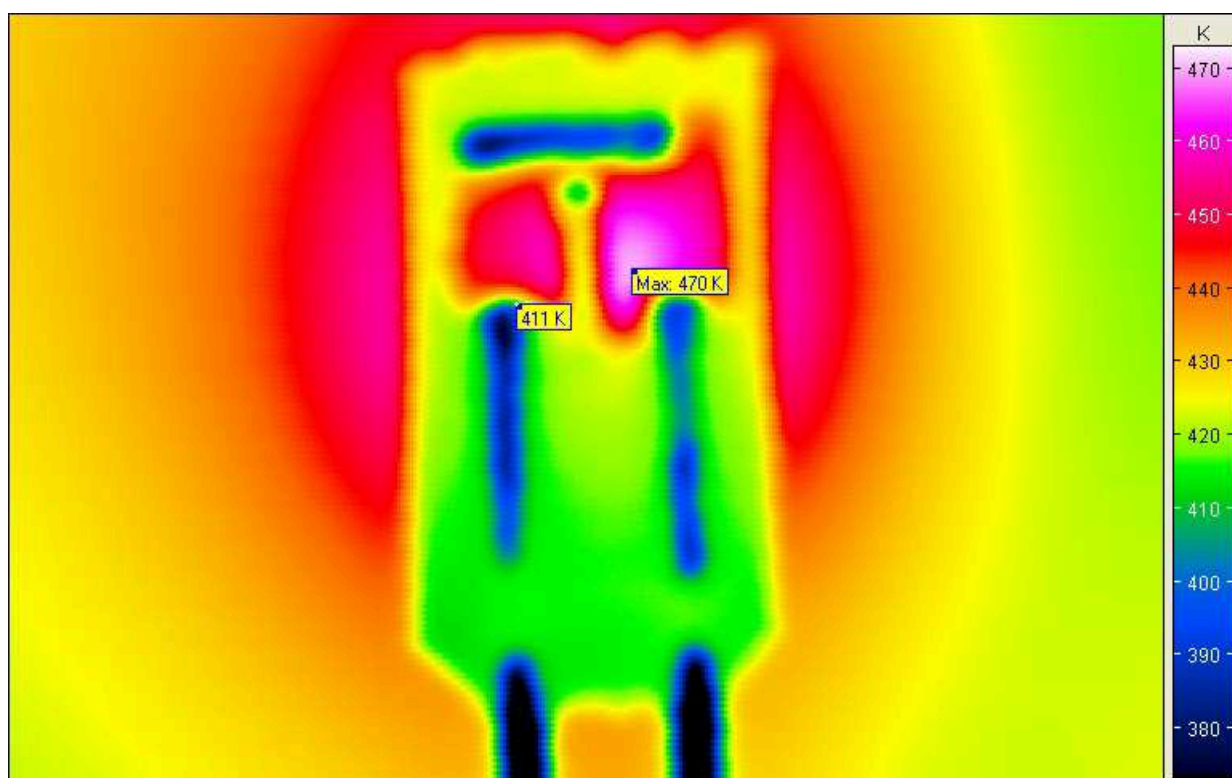


(b)

Slika 7.7: Raspodele temperature u termičkom prekidaču pri izlaganju toplotnom flukšu od 3200 W/m^2 u referentnom vremenu (a) i nakon 33 s (b).



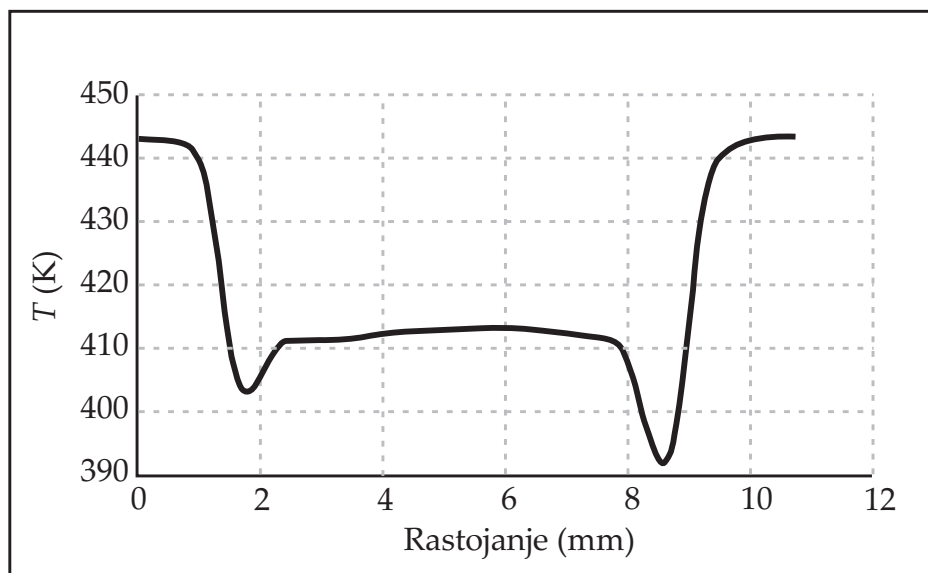
(a)



(b)

Slika 7.8: Raspodele temperature u termičkom prekidaču pri izlaganju toplotnom fluksu od 1050 W/m^2 u referentnom vremenu (a) i nakon 100 s (b).

kućišta prekidača na osnovu temperaturnog profila u preseku L01 sa slike 7.7(a). Ovaj profil je prikazan na slici 7.9 i sa njega se uočava da zadnja strana kućišta (debljine 1 mm) za 30 K snižava temperaturu kojoj je prekidač direktno izložen. Dužina leve bočne strane kućišta na preseku je 2 mm, a desne 3 mm, što na temperaturnom profilu daje razliku od 10 K. Zagrevanje provodnih elemenata se ostvaruje posredno, što i uslovljava relativno visoka vremena odziva.



Slika 7.9: Temperaturni profil u preseku L01 sa slike 7.7(a).

S obzirom da se primarno zagrevanje vrši sa jedne strane kućišta njegova termička otpornost je određena postojećim temperaturnim gradijentom na ovom delu strukture. Termička otpornost se određuje na osnovu izraza [126]:

$$R_{\Theta} = \frac{\Delta T}{Q}, \quad (7.1)$$

gde je ΔT razlika temperature na dvema stranama strukture (ovde je to zadnja strana kućišta) i Q dovedena količina toplote. Na osnovu prikazanog temperaturnog profila za vrednost termičke otpornosti prekidača se dobija 97 K/W. Ovako visoka vrednost je uslovljena niskom termičkom provodnošću makrolona.

Smanjenjem debljine zidova kućišta moguće je obezbediti brži temperaturni odziv prekidača, ukoliko se istovremeno koriguju njegove spoljašnje dimenzije. Na taj način se smanjuje udeo materijala niže toplotne provodnosti (makrolon i vazduh unutar komponente) u konstrukciji prekidača i omogućuje brže reagovanje na promenu temperature okoline. Sa druge strane, smanjenje debljine zidova kućišta uz zadržavanje spoljnih dimenzija ne doprinosi promeni vremena odziva zbog povećanog udela vazduha u provođenju toplote (razmatranje analogno rezultatima simulacije predstavljenim u poglavlju 6.3). Ograničavajući faktor pri smanjenju debljine zidova kućišta predstavljaju njegove mehaničke karakteristike. Optimalna vrednost debljine zidova kućišta koja zadovoljava dva navedena protivurečna uslova je procenjena na 0,5 mm.

Zaključak

Karakteristike električnih kontakata u električnom, termičkom i mehaničkom pogledu definišu efikasnost, kvalitet i pouzdanost prekidačkih sklopova u okviru kojih funkcionišu. Postupci projektovanja i optimizacije ovih komponenti treba da omoguće njihovu realizaciju koja zadovoljava najviše kriterijume po pitanju funkcionalnosti, pouzdanosti, ekonomske isplativosti i ekološke podobnosti. S obzirom da su u realnoj primeni kontakti izloženi raznovrsnim radnim uslovima, određivanje optimalnog dizajna predstavlja kompleksan zadatak. Ovom disertacijom su projektovanje i optimizacija električnih kontakata zakovičastog oblika realizovani primenom 3-D numeričke simulacije njihovih električnih, termičkih i mehaničkih karakteristika u stacionarnom režimu. Simulacijama su obuhvaćeni kontakti masivnog tipa izrađeni od srebra i bimetalni kontakti izrađeni od bakra i prevučeni slojem tri različite legure na bazi srebra. Kontakti su razmatrani u okviru pogodne noseće strukture u vidu elastične pločice od bakra, pri čemu su razmatrana dva načina ograničenja slobode njenog kretanja. Poseban akcenat je stavljen na generisanje zavisnosti temperature i maksimalnog ekvivalentnog naprezanja u kontaktima za različite vrednosti primenjene struje. Na taj način je ostvaren najbolji uvid u rezultate simulacije za različite primenjene materijale i set vrednosti dimenzionih i geometrijskih parametara. Na osnovu realizovanih postupaka optimizacije izvršen je izbor kontaktnih materijala, definisane vrednosti prečnika i ugla nagiba glave kontakata i specificirane vrednosti maksimalne nominalne struje. Rezultati su predstavljeni za tri izdvojena sistema koji se razlikuju po tipu kontakata i nosećoj strukturi. To su sistem sa masivnim Ag kontaktom, sistem sa bimetalnim kontaktom i jednostrukim ograničenjem slobode kretanja i sistem sa bimetalnim kontaktom i dvostrukim ograničenjem slobode kretanja.

Za sistem sa masivnim Ag kontaktom izvršena je verifikacija funkcionalnosti dizajna kontakta koji uključuje zaobljeni oblik glave prečnika 3 mm, silu kontaktiranja 0,15 N/A i 0,2 N/A i nominalnu vrednost struje 15 A. Procenjeni životni vek kontakta usled zamora materijala je preko 10^6 ciklusa kontaktiranja. Noseća struktura u vidu elastične pločice izrađene od bakra, sa jednostrukim ograničenjem slobode kretanja u potpunosti zadovoljava prekidačke karakteristike razmatranog sistema.

Kod sistema sa bimetalnim kontaktima i jednostrukim ograničenjem slobode kretanja utvrđeno je da mehaničke karakteristike strukture ograničavaju njihovu primenu, dok temperaturni aspekt nije kritičan. Za ostvarenje životnog veka prekidačkog sklopa od 10^4 ciklusa kontaktiranja pri nominalnoj struji od 40 A i sili kontaktiranja od 0,36 N/A, neophodno je usvojiti prečnik glave od 5 mm. Duža funkcionalnost kontakata zahteva smanjenje vrednosti nominalne struje na 15 A za broj kontaktiranja reda 10^5 i na 11 A za 10^6 kontaktiranja. Adekvatnim smanjenjem vrednosti nominalne struje na 15 A omogućava se i realizacija prekidačkih sklopova sa kontaktima čiji je ugao nagiba glave 15° , a pouzdan rad obezbeđen za 80000 ciklusa kontaktiranja. Na taj način se smanjuje utrošak materijala prevlake, povišava vrednost pritiska kontaktiranja i smanjuje kontaktna

otpornost. Mehaničkim karakteristikama noseće strukture ovakvog sistema nominalna struja je takođe ograničena na 15 A, dok je za više vrednosti struja neophodna izmena njenih dimenzija.

U ovoj disertaciji je utvrđeno da u prekidačkim sklopovima u kojima je sloboda kretanja dvostruko ograničena, postoji preraspodela dejstva sile kontaktiranja, čime je obezbeđen pouzdan rad kontakata za više od 10^6 ciklusa kontaktiranja, pri nominalnoj struji od 40 A, a za sve razmatrane prečnike kontaktne glave. U termičkom pogledu u ovakvom sistemu postoje više temperature nego kod jednostrukog ograničenja slobode kretanja, ali se kreću u okviru propisanih granica. Predložena je realizacija prekidačkih sklopova sa kontaktima čiji je ugao nagiba glave 15° kao optimalna. Njom se, pri postavljenim graničnim radnim uslovima, obezbeđuje 10^6 kontaktiranja uz manji utrošak materijala, više vrednosti kontaktnog pritiska i niže vrednosti maksimalnog ekvivalentnog naprezanja. Utvrđeno je da je noseća struktura u sistemima sa dvostrukim ograničenjem slobode kretanja u potpunosti funkcionalna za vrednosti struje do nominalne.

Kroz ekološki aspekt optimizacije bimetalnih kontakata potvrđeno je da je u potpunosti opravdana njihova realizacija sa legurama Ag-Ni i Ag-Cu kao materijalima prevlake umesto široko rasprostranjene toksične legure Ag-CdO.

Funkcionalnost, kvalitet i pouzdanost termičkih prekidača se definišu na osnovu vrednosti i vremenske stabilnosti njihove radne temperature, vremena odziva, električne otpornosti provodnog i izolacionog dela i mehaničke čvrstoće pri raznovrsnim radnim uslovima. Vitalni deo termičkih prekidača čine lemnii listovi izrađeni od niskotopivih legura i u tom smislu neophodno je poznavanje njihovih termičkih karakteristika (prvenstveno zavisnost tačke topljenja od sastava) i mikrostrukturnih karakteristika (struktura i sastav zrna). U ovoj disertaciji je predložen novi metod generisanja likvidus površina trokomponentnih sistema u koje spadaju i mnoge niskotopive legure. Nazvan je metod površinskog modeliranja i bazira se na poznavanju faznih dijagrama binarnih pod sistema i minimalnog seta eksperimentalnih tačaka koji su javno dostupni. Kao softverski alat koristi neki od programa za modeliranje proizvoljnih glatkih 3-D površina. Novim metodom je moguće ekstrahovati temperature likvidusa za zadati sastav trokomponentnog sistema, ali i odrediti sastav sistema koji zadovoljava postavljeni kriterijum maksimalne temperature topljenja. Primena metoda površinskog modeliranja je verifikovana kroz generisanje 2-D prezentacija likvidus površina tri trokomponentne niskotopive legure.

U disertaciji su prikazani i rezultati mikrostrukturne analize SEM i EDS tehnikama dveju eutektičkih legura značajnih za primenu u termičkim prekidačima. Utvrđivanjem strukture zrna legura omogućeno je predviđanje mehaničkih karakteristika od njih realizovanih lemnii spojeva. Sa druge strane, poznavanjem sastava zrna legura omogućeno je specificiranje uslova njihovog procesiranja.

Za realizaciju postupaka projektovanja i optimizacije termičkih prekidača korišćeni su rezultati njihove 3-D simulacije u električnom i termičkom domenu. Izvršene su analize karakteristika u stacionarnom i vremenski promenljivom režimu sa posebnim akcentom na temperaturne parametre i vreme odziva. Razmatrani su termički prekidači sa radialnim izvodima, konstrukciono izvedeni sa oprugom i smešteni u plastično kućište, čiji je nominalni napon 250 V, a nominalna struja 12 A. Na osnovu temperaturnih specifikacija posmatrani prekidači su označeni kao tipovi S-95 i S-138 (sa temperaturnom prekidanja 95°C i 138°C). Na bazi rezultata simulacije definisane su optimalne dimenzije elemenata termičkih prekidača uz sagledavanje funkcionalnog, ekonomskog i tehnološkog aspekta. Takođe je izvršeno predviđanje vremena odziva za zadate radne

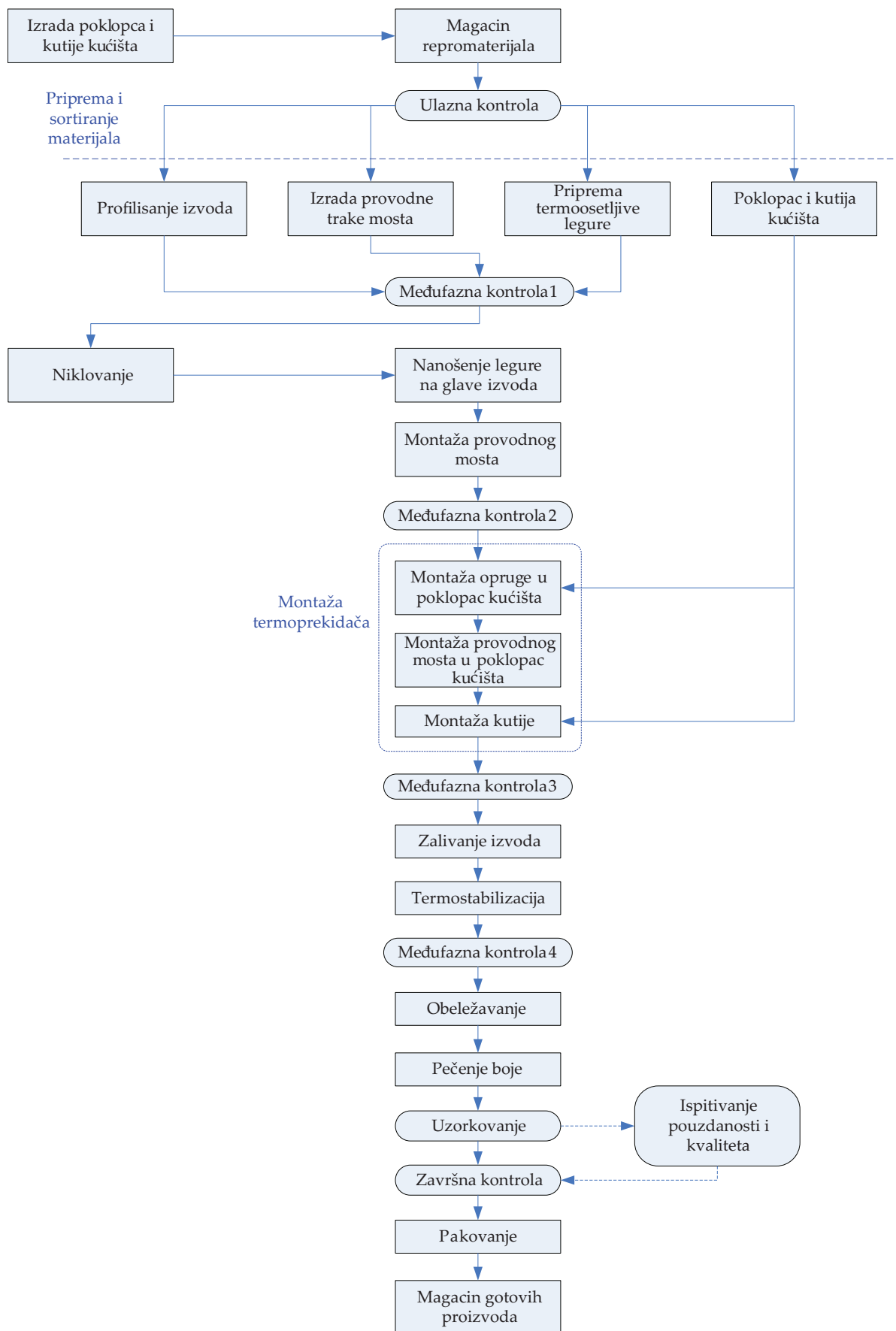
uslove i parametre kvaliteta prekidača. Ovo su jedinstveni rezultati primene simulacione tehnike u postupcima projektovanja i optimizacije termičkih prekidača, s obzirom da, u autoru dostupnoj literaturi, ova problematika nije obrađivana.

U okviru disertacije je izvršena funkcionalna i kvalitativna analiza termičkog prekidača tipa S-138 snimanjem temperaturnih raspodela unutar prekidača pri raznovrsnim radnim uslovima primenom termovizijskog mernog metoda. Na ovaj način je izbegnuto korišćenje specijalizovanih komora za regulaciju temperature i omogućeno funkcionisanje prekidača u radnim uslovima bliskim realnim. Eksperimentalno je registrovan porast radne temperature usled efekta samozagrevanja, verifikovane su temperature prekidanja i procenjena vremena odziva. Time je omogućeno postavljanje graničnih termičkih uslova neophodnih za uspešnu optimizaciju prekidača kroz postupak simulacije njihovih električnih i termičkih karakteristika. Takođe, dobijeni podaci su upotrebljeni kao pokazatelji termičkih osobina kućišta i provodnih elemenata prekidača.

Kao sveobuhvatni rezultat postupaka projektovanja i optimizacije termičkih prekidača izloženih u disertaciji razvijen je tehnološki niz i izrađena kompletna tehnička dokumentacija za proizvodnju termičkih prekidača. Definisani dijagram toka tehnološkog niza proizvodnje termičkih prekidača S tipa sa specificiranim koracima pripreme i sklapanja sastavnih elemenata i postupcima ispitivanja kvaliteta i pouzdanosti je ilustrovan na slici 8.1.

U tehnološkom nizu proizvodnje definisano je ukupno 19 postupaka povezanih u jedinstven proizvodni proces. Svi postupci se obavljaju unutar jednog proizvodnog pogona, sa izuzetkom niklovanja i brizganja plastike koji se obavljaju kao uslužne delatnosti. Polufabrikati izlaze iz proizvodnog pogona na eksternu doradu samo na jednom mestu (niklovanje), čime je tok proizvodnog procesa maksimalno približen idealnom sekvencijalnom obliku.

Projektovana tehnološka linija uključuje opremu za proizvodnju i kontrolu kvaliteta termičkih prekidača. Za svaku tehnološku operaciju urađena je proizvodna dokumentacija koja je data u Dodatku A. Osim definicije potrebnih ulaznih parametara specificiran je broj izvršilaca, bezbedonosne i mere zaštite na radu. Tehnološka linija omogućava optimalan protok repromaterijala i polufabrikata između radnih mesta i automatizaciju linije na nivou od približno 50%.



Slika 8.1: Dijagram toka tehnološkog niza proizvodnje termičkih prekidača.

Dodatak A

Opis tehnološkog niza proizvodnje termičkih prekidača

| Kontrola kvaliteta: Ulazna kontrola | | | | | |
|---|--|--|--|-------------------------------|---|
| Vrsta kontrole | Predmet kontrole | Metod | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Kriterijum | Opis |
| Kontrola gabarita | Bakarna žica za profilisanje izvoda i za provodnu traku mosta | Vizuelna inspekcija, merenje debljine (prečnika) | Mikrometarski zavrtanj | Prema deklaraciji proizvođača | Uzorkovanje |
| Kontrola temperature topljenja i kvaliteta legure | Termoosetljiva legura | Merenje temperature (redovno); SEM i EDS analiza (pri uvođenju novog tipa, pri promeni dobavljača) | Precizni merač temperature, skalpel, teflonski kalup, električni grejač. | Temperatura topljenja | Uzorkovanje se vrši sa ingota struganjem 5-10 g legure. Uzorak se stavlja u teflonski kalup i zagreva pomoću električnog grejača. Temperatura se prati pomoću preciznog merača temperature. |
| Kontrola gabarita | Poklopac i kutija kućišta | Vizuelna inspekcija i provera gabarita | Kljunasto merilo | Prema tehničkoj dokumentaciji | Uzorkovanje |
| Kontrola gabarita | Čelična opruga | Merenje dužine | Mikrometarski zavrtanj | Prema deklaraciji proizvođača | Uzorkovanje |
| Broj izvršilaca | 1 | | | | |
| Školska sprema | KV, VKV | | | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Po završetku provere temperature topljenja obavezno isključivanje električnog grejača. | | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; Prilikom uzorkovanja termoosetljive legure obavezna upotreba pamučnih rukavica; Prilikom provere temperature topljenja obavezna upotreba zaštitne maske za usta i nos. | | | | |

Napomena: SEM i EDS analize se rade u Laboratoriji za elektronsku mikroskopiju Elektronskog fakulteta u Nišu.

| Tehnološki postupak: Profilisanje izvoda | | | |
|---|---|--|--|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Bakarna žica Ø 1,2mm, kotur | Automatska mašina za ispravljanje, odsecanje i profilisanje žice, transportne kutije | Kotur žice se navlači na nosač kotura i zabravluje polužnim osiguračem. Slobodni kraj žice se provlači kroz uvodnik za ispravljanje i preklapa frikcionim transportnim kalemom. Podešavanje dužine odsecanja vrši se pomeranjem odstojnika noža za odsecanje. Kraj žice se profiliše u alatu tako da se formira lemna glava, a zatim se vrši odsecanje. Profilisani izvodi se skladište u transportnu kutiju i odnose na niklovanje. |
| Broj izvršilaca | 1 | | |
| Školska sprema | KV, VKV | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Uključena mašina se ne sme ostaviti bez nadzora; Nisu dozvoljene manuelne intervencije na delu za odsecanje dok mašina radi; Poluga prese pritiska se upotrebom obe ruke. | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | |

| Tehnološki postupak: Izrada provodne trake mosta | | | |
|---|--|--|--|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Bakarna žica Ø 1,6mm, kotur | Automatska mašina za ispravljanje i odsecanje žice, ručna presa, alat za profilisanje, pinceta, transportne kutije | Na automatskoj mašini za ispravljanje i odsecanje žice vrši se odsecanje na dužinu provodne trake mosta. Trake (pripremljeni) se pincetom postavljaju u kokilu koja se učvršćuje na radni sto ručne prese. Na glavu prese pričvršćuje se alat koji oblikuje profil trake mosta. Zatvaranjem prese pripremljeni se oblikuju u željeni profil i zatim vade iz kokile. Provodne trake se skladište u transportnu kutiju i odnose na niklovanje. |
| Broj izvršilaca | 1 | | |
| Školska sprema | KV, VKV | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Uključena mašina se ne sme ostaviti bez nadzora; Nisu dozvoljene manuelne intervencije na delu za odsecanje dok mašina radi; Poluga prese pritiska se upotrebom obe ruke | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | |

| Tehnološki postupak: Niklovanje | | | |
|--|---|--|--|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Profilisani izvodi, trake mosta, niklena so | Linija za hemijsko niklovanje | Niklovanje se vrši u pogonu za galvanizaciju i na tehnološku liniju se dopremaju polufabrikati. Debljina niklenog sloja je 1 μm . |

| Tehnološki postupak: Izrada lemnih listova | | | |
|---|---|---|---|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Termoosetljiva legura, ingot | Mašina za valjanje legura, ručni polužni sekač, indukciona peć. | Ingot se postavlja između valjaka i mašina se uključuje. Nakon završetka ciklusa valjanja mašina se isključuje. Uklanjanje viška legure se vrši sa obe strane ručnim polužnim sekačem. Rastojanje između valjaka se smanjuje podešavanjem vrednosti graničnika i proces se ciklično ponavlja, sve dok debljina lemnog lista ne bude 150 μm . Višak legure se postavlja u kalup ingota. Kada se kalup ingota napuni ubacuje se u indukcionu peć. Temperatura peći se podešava na 150°C i peć se uključuje. Proces pretapanja traje 30 min, nakon čega se peć isključuje. Proces hlađenja traje 30 min, nakon čega se kalup ingota vadi iz peći i ingot izvlači odvajanjem od zidova kalupa. |
| Broj izvršilaca | 1 | | |
| Školska sprema | KV, VKV | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Obavezan nadzor tokom rada mašine; Nisu dozvoljene manuelne intervencije na delu za valjanje dok mašina radi; Uključena mašina se ne sme ostaviti bez nadzora. | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; Obavezna upotreba pamučnih rukavica; Obavezna upotreba zaštitne maske za usta i nos. Poluga sekača pritiska se upotrebom obe ruke. | | |

| Tehnološki postupak: Izrada kutije i poklopca kutije | | | |
|---|------------------------|--|--|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Makrolon, polikarbonat | Alat za izradu kutije i poklopca, mašina za brizganje plastike | Kutija i poklopac se izrađuju u pogonu za proizvodnju plastičnih delova i na tehnološku liniju dolaze kao polufabrikati. |

| Kontrola kvaliteta: Međufazna kontrola 1 | | | | | |
|---|-----------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------|
| Vrsta kontrole | Predmet kontrole | Metod | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Kriterijum | Opis |
| Dužina izvoda | Profilisani izvod | Merenje dužine | Kljunasto merilo | Prema tehničkoj dokumentaciji | |
| Debljina provodnog mosta | Traka provodnog mosta | Merenje debljine | Mikrometarski zavrtanj | Prema tehničkoj dokumentaciji | |
| Debljina lemnog lista | Lemni list | Merenje debljine | Mikrometarski zavrtanj | Prema tehničkoj dokumentaciji | |
| Broj izvršilaca | 1 | | | | |
| Školska sprema | KV, VKV | | | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | | | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | | | |

| Tehnološki postupak: Nanošenje legure na glave izvoda | | | |
|--|---|--|--|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Lemni listovi, profilisani izvodi | Poluautomatsko kalajno kupatilo, šaržeri, transportne kutije | Lemni listovi se postavljaju na dno kade kalajnog kupatila. Termostatom kupatila podešava se temperatura zagrevanja na 150°C. Kupatilo se uključuje i nakon 10 min se vrši provera da li su se lemni listovi ravnomerno istopili. Merač vremena na kupatilu se postavlja na vrednost od 3 s. Profilisani izvodi se ravnim krajem (suprotnim od lemne glave) umeću u otvore na šaržeru. Šaržer se zatvara i uglavljuje u šine nosača na kupatilu. Nosač se pomera okretanjem ručice za horizontalno kretanje, sve do horizontalnog graničnika. Time je nosač postavljen u horizontalni položaj centralno u odnosu na kadu kupatila. Pritiskom na dugme za vertikalno kretanje nosač se spušta u kadu kupatila do visine određene vertikalnim graničnikom. Kada merač vremena odbroji vreme, nosač se automatski podiže iz kade i linearno pomera okretanjem ručice za horizontalno kretanje izvan zone kade kupatila. Šaržer se skida sa nosača i izvodi oslobađaju iznad transportne kutije. |
| Broj izvršilaca | 1 | | |
| Školska sprema | KV, VKV | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Po završetku procesa obavezno isključivanje kalajnog kupatila; | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; Obavezno uključivanje ventilacije iznad prostora kalajnog kupatila; Obavezna upotreba pamučnih rukavica; Obavezna upotreba zaštitne maske za usta i nos. | | |

Napomena: Proveru pozicija horizontalnog i vertikalnog graničnika kontroliše poslovođa pre početka operacije.

| Tehnološki postupak: Montaža provodnog mosta | | | |
|--|---|---|---|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Profilisani izvodi, trake mosta | Električna lemilica sa duplim vrhom, podnožje profila izvoda, uveličavajuće staklo, pinceta, transportne kutije | Operacija se obavlja pod uveličavajućim staklom. Temperatura vrha lemilice se podešava na 150°C preko regulatora. Dva profilisana izvoda se hvataju pincetom i umeću u otvore na podnožju. Traka provodnog mosta se hvata pincetom, postavlja simetrično u odnosu na izvode tako da nalegne na lemne glave i blago pritisne odozgo. Bez ispuštanja provodne trake drugom rukom se spoju lemnih glava i trake mosta približi lemilica i ostvaruje istovremeni kontakt oba vrha lemilice sa lemnim glavama izvoda u trajanju od 2-3 s. Lemilica se udaljava i formirani most se pincetom vadi iz podnožja i odlaže u transportnu kutiju. U slučaju da prilikom vađenja mosta dođe do odvajanja jednog ili oba izvoda, operacija se ne ponavlja, već se uzimaju novi izvodi i trake mosta. |
| Broj izvršilaca | 1 | | |
| Školska sprema | KV | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Pri svakom prekidu rada obavezno isključivanje električne lemilice; | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; Obavezna upotreba pamučnih rukavica; Obavezna upotreba zaštitne maske za usta i nos; Obavezna pauza u trajanju od 15 min, na svakih 45 min rada. | | |

| Kontrola kvaliteta: Međufazna kontrola 2 | | | | | |
|---|------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------|---------------|
| Vrsta kontrole | Predmet kontrole | Metod | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Kriterijum | Opis |
| Električna kontrola | Provodni most | Merenje otpornosti | Digitalni multimetar | Kratak spoj | 100% kontrola |
| Broj izvršilaca | 1 | | | | |
| Školska sprema | KV | | | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | | | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | | | |

| Tehnološki postupak: Montaža termoprekidača | | | |
|---|--|---|---|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Provodni most, čelična opruga, poklopac kućišta, kutija kućišta | Podnožje za poklopac kućišta, uveličavajuće staklo, pinceta, transportne kutije | <p>Operacija se obavlja pod uveličavajućim staklom. <i>Montaža opruge u poklopac kućišta:</i> Poklopac kućišta se hvata pincetom i postavlja u podnožje tako da su mu graničnici okrenuti na gore. Opruga se hvata pincetom i postavlja u srednji otvor na poklopcu. <i>Montaža provodnog mosta u poklopac kućišta:</i> Provodni most se potiskuje na dole tako da izvodi prođu kroz otvore na poklopcu kućišta. Potiskivanje se zaustavlja kada provodni most dođe do graničnika na poklopcu kućišta. Za vreme potiskivanja se opruga pridržava pincetom. <i>Montaža kutije:</i> Kutija se postavlja preko poklopca kutije i potiskuje na dole sve dok se zubac poklopca ne zaglavi u žljeb na kutiji. Poklopac kućišta se oslobađa iz podnožja i montirani termoprekidač se odlaže u transportnu kutiju.</p> <p>U slučaju da prilikom montaže dođe do odvajanja jednog ili oba izvoda provodnog mosta ili njihovog krivljenja, savijanja trake provodnog mosta, krivljenja opruge, loma ili naprsnuća poklopca ili kutije, operacija se ne nastavlja, već se termoprekidač montira iz početka, sa novim delovima.</p> |
| Broj izvršilaca | 2 | | |
| Školska sprema | KV | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; Obavezna upotreba pamučnih rukavica; Obavezna pauza u trajanju od 15 min, na svakih 45 min rada. | | |

| Kontrola kvaliteta: Međufazna kontrola 3 | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------|---------------|
| Vrsta kontrole | Predmet kontrole | Metod | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Kriterijum | Opis |
| Električna kontrola | Termoprekidač, montirani | Merenje otpornosti | Digitalni multimetar | Kratak spoj | 100% kontrola |
| Broj izvršilaca | 1 | | | | |
| Školska sprema | KV | | | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | | | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | | | |

| Tehnološki postupak: Zalivanje izvoda | | | |
|---|---|---|--|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Termoprekidač montirani, silikonski lak | Pneumatski uređaj za zalivanje, podnožje termoprekidača, paleta | Montirani termoprekidač se postavlja u podnožje sa izvodima okrenutim na gore. Pipeta uređaja se prinosi spoju izvoda i poklopca kućišta i pritiskom na papučicu se istiskuje kap silikonskog laka. Podnožje se okreće za 180° i postupak se ponavlja na drugom spoju. Podnožje se još jednom okreće za 180°, kako bi se obezbedilo ravnomerno razlivanje laka oko spojeva. Termoprekidač se oslobađa iz podnožja i postavlja u paletu za sušnicu u vertikalnom položaju, sa izvodima okrenutim na gore. |
| Broj izvršilaca | 1 | | |
| Školska sprema | KV | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; Obavezna upotreba pamučnih rukavica; Obavezna upotreba zaštitne maske za usta i nos; Obavezna pauza u trajanju od 15 min, na svakih 45 min rada. | | |

| Tehnološki postupak: Termostabilizacija | | | |
|---|--|-------------------------------------|---|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Termoprekidač montirani, sa zalivenim izvodima | Sušnica, transportne kutije | Paleta sa termoprekidačima se postavlja u sušnicu. Temperatura i vreme termostabilizacije se određuju prema tehničkoj dokumentaciji za tip termoprekidača: a) za termoprekidač tipa S-95 je temperatura termostabilizacije 75 °C, a vreme trajanja procesa 12 sati; b) za termoprekidač tipa S-138 je temperatura termostabilizacije 120 °C, a vreme trajanja procesa 6 sati; U slučaju nestanka napajanja, sušnica ostaje zatvorena. Nakon uspostavljanja napajanja vreme termostabilizacije se produžava do predviđenog i produžava još 30 min. Po završetku procesa sušnica ostaje zatvorena još 30 min. Nakon toga se termoprekidači vade sa palete i prebacuju u transportnu kutiju. |
| Broj izvršilaca | 1 | | |
| Školska sprema | KV | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Uključena sušnica se ne sme ostaviti bez nadzora; | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | |

| Kontrola kvaliteta: Međufazna kontrola 4 | | | | | |
|---|---------------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------|---------------|
| Vrsta kontrole | Predmet kontrole | Metod | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Kriterijum | Opis |
| Električna kontrola | Termoprekidač neobeleženi | Merenje otpornosti | Digitalni multimetar | Kratak spoj | 100% kontrola |
| Broj izvršilaca | 1 | | | | |
| Školska sprema | KV | | | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | | | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | | | |

| Tehnološki postupak: Obeležavanje | | | |
|---|---|--|--|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Termoprekidač neobeleženi, boja crna | Mašina za obeležavanje, paleta | Pre uključivanja mašine vrši se provera nivoa boje u rezervoaru i ispravnosti pečata. Takođe se vrši upoređenje natpisa na pečatu i propratnici. Termoprekidači se postavljaju u uvodnik mašine za obeležavanje. Obeležavanje se vrši tehnikom rotacionog pečatiranja. Obeleženi termoprekidači se postavljaju u paletu sa izvodima okrenutim na dole. |
| Broj izvršilaca | 1 | | |
| Školska sprema | VKV | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Uključena mašina se ne sme ostaviti bez nadzora; | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | |

| Tehnološki postupak: Pečenje boje | | | |
|---|--|--|---|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Termoprekidač neobeleženi | Sušnica, transportne kutije | Paleta sa termoprekidačima se postavlja u sušnicu. Temperatura pečenja je 70 °C, a vreme trajanja 15 min. U slučaju nestanka napajanja, sušnica ostaje zatvorena. Nakon uspostavljanja napajanja vreme pečenja se produžava do predviđenog i produžava još 5 min. Po završetku procesa sušnica ostaje zatvorena još 15 min. Nakon toga se termoprekidači vade sa palete i prebacuju u transportnu kutiju. |
| Broj izvršilaca | 1 | | |
| Školska sprema | KV | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Uključena sušnica se ne sme ostaviti bez nadzora; | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | |

| Kontrola kvaliteta: Ispitivanje kvaliteta | | | | | |
|---|---|---|--|---|---|
| Vrsta kontrole | Predmet kontrole | Metod | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Kriterijum | Opis |
| Električna i termička kontrola | Termoprekidač obeleženi | Testiranje radne temperature (redovno pri uvođenju novog tipa, periodično za osvojene tipove) | Burn-in komora sa automatskom kontrolom temperature, precizni merač temperature, izvor DC napona, ampermetar | $T_f - 10^{\circ}\text{C} \div T_f + 0^{\circ}\text{C}$ | Iz serije proizvedenih prekidača uzima se uzorak veličine koja odgovara veličini serije. Svaki prekidač iz uzorka podvrgava se testu pojedinačno. Prekidač se unosi u burn-in komoru i polariše da kroz njega protiče struja jačine 10 mA. Zatim se uključuje burn-in komora pri podešenoj brzini zagrevanja od $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. U trenutku prekida strujnog kola beleži se temperatura neposredne okoline prekidača. |
| Broj izvršilaca | 1 | | | | |
| Školska sprema | SSS | | | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Uključena burn-in komora se nadzire periodično; | | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | | | |

Napomena: Testiranje u burn-in komori se radi u Laboratoriji za mikroelektroniku Elektronskog fakulteta u Nišu.

| Kontrola kvaliteta: Ispitivanje kvaliteta | | | | | |
|---|---|--|-------------------------------------|------------|---|
| Vrsta kontrole | Predmet kontrole | Metod | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Kriterijum | Opis |
| Električna kontrola | Termoprekidač obeleženi | Testiranje otpornosti izolacije (redovno pri uvođenju novog tipa, periodično za osvojene tipove) | Izvor DC napona, pikoampermetar | >100 MΩ | Iz serije proizvedenih prekidača uzima se uzorak veličine koja odgovara veličini serije. Svaki prekidač iz uzorka podvrgava se testu pojedinačno. Između jednog od izvoda prekidača i kućišta dovodi se napon od 500 V. Po isteku 1 min meri se struja. |
| Broj izvršilaca | 1 | | | | |
| Školska sprema | SSS | | | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Poštovanje posebnih standarda za rukovanje izvorima visokog napona. | | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | | | |

Napomena: Testiranje se radi u Laboratoriji za mikroelektroniku Elektronskog fakulteta u Nišu.

| Kontrola kvaliteta: Ispitivanje pouzdanosti | | | | | |
|---|---|---|--|------------|--|
| Vrsta kontrole | Predmet kontrole | Metod | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Kriterijum | Opis |
| Električna i termička kontrola | Termoprekidač obeleženi | Testiranje stabilnosti radne temperature (redovno pri uvođenju novog tipa, periodično za osvojene tipove) | Burn-in komora sa automatskom kontrolom temperature, precizni merač temperature, izvor DC napona, ampermetar | | Iz serije proizvedenih prekidača uzima se uzorak veličine koja odgovara veličini serije. Prekidači iz uzorka se unose u burn-in komoru. Temperatura žarenja se podešava prema tipu prekidača: a) za termoprekidač tipa S-95 na 75°C, b) za termoprekidač tipa S-138 na 118°C. Vreme žarenja je 500h. Po završenom žarenju svaki termoprekidač iz uzorka prolazi test radne temperature |
| Broj izvršilaca | 1 | | | | |
| Školska sprema | SSS | | | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | Poštovanje opštih standarda za upotrebu električnih uređaja; Uključena burn-in komora se nadzire periodično; | | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | | | |

Napomena: Testiranje se radi u Laboratoriji za mikroelektroniku Elektronskog fakulteta u Nišu.

| Kontrola kvaliteta: Završna kontrola | | | | | |
|---|--------------------------|---------------------|--|----------------------------------|---------------|
| Vrsta kontrole | Predmet kontrole | Metod | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Kriterijum | Opis |
| Električna kontrola | Termoprekidač obeleženi | Merenje otpornosti | Digitalni multimetar | Kratak spoj | 100% kontrola |
| Vizuelna | Termoprekidač, obeleženi | Vizuelna inspekcija | | Vidljivost natpisa, opšti izgled | 100% kontrola |
| Broj izvršilaca | 1 | | | | |
| Školska sprema | KV | | | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | | | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | | | |

| Tehnološki postupak: Pakovanje | | | |
|---|---|--|---|
| | Repromaterijal | Instrumenti, uređaji, alat i pribor | Opis |
| | Termoprekidač obeleženi, natpisni karton, najlonska kesica, zbirna kutija, samolepljiva traka | Ručna heftalica, transportne kutije | Pakovanje se vrši u najlonske kesice, standardno po 10 komada prekidača. U svaku kesicu se ubacuje natpisni karton. Vrh kesice se presavija i zatvara pomoću ručne heftalice. Zbirno pakovanje se vrši u kartonske kutije, standardno po 20 kesica u kutiju, ili prema zahtevu kupca. Kutije se zatvaraju samolepljivom trakom. |
| Broj izvršilaca | 1 | | |
| Školska sprema | KV | | |
| Bezbedonosne i mere protivpožarne zaštite | | | |
| Mere zaštite na radu | Radni mantil; | | |

Publikovani radovi i realizovana tehnička rešenja iz oblasti

1. A. Prijić, Z. Prijić, B. Pešić, D. Pantić, S. Ristić, "Analysis of Electrical and Thermal Characteristics of Thermal Cutoffs", prihvaćen za prezentovanje na *XLII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies – ICEST 2007*, Ohrid, Macedonia, Jun, 2007.
2. A. Prijić, D. Mančić, Z. Petrušić, B. Pešić, D. Pantić, Z. Prijić, "Analiza elektrotermičkih karakteristika termičkih prekidača", *Zbornik radova LI konferencije ETRAN*, IV sveska, Igalo, Crna Gora, Jun, 2007.
3. Z. Petrušić, A. Prijić, D. Mančić, D. Pantić, Z. Prijić, B. Pešić, "Verifikacija karakteristika termoprekidača primenom termovizijskog mernog metoda", *Zbornik radova LI konferencije ETRAN*, IV sveska, Igalo, Crna Gora, Jun, 2007.
4. A. Prijić, B. Pešić, Z. Prijić, D. Pantić, S. Ristić, "Analiza karakteristika termičkih prekidača 3D numeričkom simulacijom", *Zbornik radova VI simpozijuma o industrijskoj elektronici INDEL2006*, pp. 48–52, Banja Luka, Republika Srpska, Novembar, 2006.
5. A. Prijić, B. Pešić, Z. Prijić, "Karakterizacija niskotopivih legura za primenu u termičkim prekidačima", *Zbornik radova L konferencije ETRAN*, IV sveska, pp. 119–122, Beograd, Srbija i Crna Gora, Jun, 2006.
6. A. Prijić, Z. Prijić, B. Pešić, "A New Method of Evaluation of Liquidus Temperatures of Ternary Alloys", *Proc. 25th International Conference on Microelectronics (MIEL2006)*, pp. 395–399, Belgrade, Serbia and Montenegro, May, 2006.
7. A. Prijić, B. Pešić, Z. Prijić, D. Pantić, "Temperature and Yield Stress Characterization of Electric Contacts by 3–D Numerical Simulation", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 77–91, 2005.
8. A. Prijić, B. Pešić, Z. Prijić, "Analiza ekvivalentnog naprezanja u električnim kontaktima – uticaj dimenzija i geometrije kontakata", *Zbornik radova XLVIII konferencije ETRAN*, IV sveska, pp. 93–96, Čačak, Srbija i Crna Gora, Jun, 2004.
9. A. Prijić, B. Pešić, Z. Prijić, D. Pantić, Z. Pavlović, "3D Simulation of Electric Contacts – Temperatures and Yield Stress Distributions", *Proc. 7th International Symposium on Microelectronics Technologies and Microsystem – MTM'03*, pp. 57–62, Sofia–Sozopol, Bulgaria, September, 2003 – (nagrađeni studentski rad).
10. A. Prijić, B. Pešić, Z. Prijić, D. Pantić, Z. Pavlović, "3D simulacija mehaničkih, električnih i termičkih karakteristika električnih kontakata", *Zbornik radova XLVII konferencije ETRAN*, IV sveska, pp. 229–232, Igalo, Srbija i Crna Gora, Jun, 2003.

-
11. A. Prijić, B. Pešić, Z. Prijić, D. Pantić, Z. Pavlović, "3D Simulation of Electrical and Thermal Characteristics of Electric Contacts", *ELECTRONICS*, Vol. 6, No. 2, pp. 3–5, 2002.
 12. A. Prijić, B. Pešić, Z. Prijić, D. Pantić, Z. Pavlović, "3D simulacija električnih i termičkih karakteristika električnih kontakata", *Zbornik radova IV simpozijuma o industrijskoj elektronici INDEL2002*, pp. 25–27, Banja Luka, Republika Srpska, Novembar, 2002.
 13. Z. Prijić, B. Pešić, A. Prijić, D. Pantić, S. Ristić, N. Tojagić, "Tehnološki niz proizvodnje termičkih prekidača", *Elektronski fakultet – PCB Elektronik, Niš, 2006 – rezultat projekta MNZŽS Republike Srbije – TR6140*.
 14. Z. Prijić, A. Prijić, B. Pešić, D. Pantić, S. Ristić, N. Tojagić, "Tehnološka linija za proizvodnju termičkih prekidača u skladu sa ekološkim standardima", *Elektronski fakultet – PCB Elektronik, Niš, 2006 – rezultat projekta MNZŽS Republike Srbije – TR6140*.
 15. Z. Prijić, A. Prijić, B. Pešić, D. Pantić, S. Ristić, N. Tojagić, "Prototip termičkog prekidača S–138 250V/12A $T_f=143\text{ }^\circ\text{C}$ ", *Elektronski fakultet – PCB Elektronik, Niš, 2006 – rezultat projekta MNZŽS Republike Srbije – TR6140*.
 16. Z. Prijić, A. Prijić, B. Pešić, D. Pantić, S. Ristić, N. Tojagić, "Prototip termičkog prekidača S–95 250V/12A $T_f=100\text{ }^\circ\text{C}$ ", *Elektronski fakultet – PCB Elektronik, Niš, 2006 – rezultat projekta MNZŽS Republike Srbije – TR6140*.
 17. B. Pešić, A. Prijić, Z. Prijić, D. Pantić, S. Ristić, N. Tojagić, "Metoda testiranja radne temperature termičkih prekidača", *Elektronski fakultet – PCB Elektronik, Niš, 2006 – rezultat projekta MNZŽS Republike Srbije – TR6140*.
 18. B. Pešić, A. Prijić, Z. Prijić, D. Pantić, S. Ristić, N. Tojagić, "Metoda testiranja otpornosti izolacije termičkih prekidača", *Elektronski fakultet – PCB Elektronik, Niš, 2006 – rezultat projekta MNZŽS Republike Srbije – TR6140*.
 19. B. Pešić, A. Prijić, Z. Prijić, D. Pantić, S. Ristić, N. Tojagić, "Metoda testiranja stabilnosti radne temperature termičkih prekidača", *Elektronski fakultet – PCB Elektronik, Niš, 2006 – rezultat projekta MNZŽS Republike Srbije – TR6140*.
 20. Z. Prijić, A. Prijić, B. Pešić, D. Pantić, S. Ristić, N. Tojagić, "Tehnološki postupak dobijanja lemnih listova legure Pb/Sn/Bi i Bi/Sn", *Elektronski fakultet – PCB Elektronik, Niš, 2005 – rezultat projekta MNZŽS Republike Srbije – TR6140*.
 21. Z. Prijić, A. Prijić, B. Pešić, D. Pantić, S. Ristić, N. Tojagić, "Definisanje i razvoj alata za izradu sastavnih delova termičkih prekidača", *Elektronski fakultet – PCB Elektronik, Niš, 2005 – rezultat projekta MNZŽS Republike Srbije – TR6140*.
 22. Z. Prijić, B. Pešić, A. Prijić, D. Pantić, Z. Pavlović, N. Tojagić, "Bimetalni električni kontakti zakovičastog oblika – novi proizvod", *Elektronski fakultet – PCB Elektronik, Niš, 2003 – rezultat projekta MNTR Republike Srbije – IT0179*.
 23. Z. Pavlović, Z. Prijić, B. Pešić, D. Pantić, A. Prijić, "Oprema za merenje i kontrolu karakteristika i pouzdanosti električnih kontakata", *Elektronski fakultet – PCB Elektronik, Niš, 2003 – rezultat projekta MNTR Republike Srbije – IT0179*.

Literatura

- [1] P. Goodman, "Electrical Contacts and Connectors - a comprehensive design and user guide," ERA Technology Ltd, Tech. Rep., 2002.
- [2] M. Braunović, N. Myshkin, and V. Konchits, *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology*. CRC Press, 2006.
- [3] M. Braunovic, V. Izmailov, and M. Novoselova, "A Model for Life Time Evaluation of Closed Electrical Contacts," in *Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Chicago, Illinois, USA, September 2005, pp. 217–223.
- [4] C. Aronis, C. Psomopoulos, C. Naragiannopouls, and P. Bourkas, "A Model of Electrical Contacts with Advanced Degradation," *International Journal of Modelling & Simulation*, vol. 26, no. 2, pp. 169–174, 2006.
- [5] Y. Kawakami, M. Hasegawa, Y. Watanabe, and K. Sawa, "An Investigation for the Method of Lifetime Prediction of Ag-Ni Contacts for Electromagnetic Contactor," in *Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Chicago, Illinois, USA, September 2005, pp. 151–155.
- [6] W. Xixiu, L. Zhenbiao, D. Meihua, W. Zhongchao, and S. Xiaoliang, "Simulation of Particle Flow in Molten Pool of Electric Contact of Power Switch," in *Proc. of 39th International Universities Power Engineering Conference*, Bristol, UK, September 2004.
- [7] A. Monnier, B. Froidurot, C. Jarrige, R. Meyer, and P. Teste, "A Mechanical, Electrical, Thermal Coupled-Field Simulation of a Sphere-Plane Electrical Contact," in *Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Chicago, Illinois, USA, September 2005, pp. 224–231.
- [8] ———, "A Coupled-Field Simulation of an Electrical Contact during Resistance Welding," in *Proceedings of the Fifty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Montreal, Canada, September 2006, pp. 95–102.
- [9] G. Hrovat and A. Hamler, "The Heat Circumstances in Switch by Permanent Load," in *Computer Engineering in Applied Electromagnetism*. Springer, Netherlands, 2005, pp. 293–296.
- [10] T. Imaizumi, N. Yamamoto, K. Sawa, M. Tomita, Murakami, and I. Hirabayashi, "Simulation of Current and Temperature Distribution in YBCO Bulk's Electrical Contact," *Physica C: Superconductivity*, vol. 412, no. 10, pp. 668–672., 2004.

- [11] S. Bhashyam, G. Ambrosio, D. Chichili, L. Imbasciati, S. Yadav, R. Yamada, and A. Zlobin, "Predicting Temperature Rise Due to Resistive Heating in Splice Region of $\text{Cos}\theta$ Dipole Magnets using 2D ANSYSTM Analysis," FermiLab, Batavia, Illinois, USA, Tech. Rep., 2002.
- [12] V. Brizmer, Y. Zait, Y. Kligerman, and I. Etsion, "The Effect of Contact Conditions and Material Properties on Elastic-Plastic Spherical Contact," *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, vol. 1, no. 5, pp. 865–879, 2006.
- [13] [Online]. Available: <http://www.powertech.co.nz>
- [14] WTC-Thermal Cutoffs – catalog.
- [15] [Online]. Available: <http://www.us-electronics.com/files/Thermalcutofffuses.pdf>
- [16] Panasonic-Thermal Cutoffs Data Sheet.
- [17] F. Hua, Z. Mei, and J. Glazer, "Eutectic Sn-Bi as an Alternative to Pb-Free Solders," in *Proc. of Electronic Component and Technology Conference*, Seattle, Washington, USA, 1998, pp. 277–283.
- [18] M. McCormack, Y. Degani, H. Chen, and W. Gesick, "A Lower-Melting-Point Solder Alloy for Surface Mounts," *Journal of Materials*, vol. 48, no. 5, pp. 54–56, 1996.
- [19] Z. Mei, H. Holder, and H. VanderPlas, "Low-Temperature Solders," *Hewlett-Packard Journal*, no. 8, p. art. 10, 1996.
- [20] "CALPHAD." New York: Pergamon, 1977-2006.
- [21] X. Maldague and P. Moore, Eds., *Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 3, Infrared and Thermal Testing*. American Society for Nondestructive Testing, 2001.
- [22] A. Nowakowski, "Role of IR-Thermal Imaging and Electroimpedance Measurements in Medical Diagnostics," in *27th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society*, Shanghai, China, September 2005, pp. 706–709.
- [23] C. Meola, G. Carlomagno, and L. Giorleo, "The Use of Infrared Thermography for Materials Characterization," *Journal of Processing Materials Technology*, vol. 155-156, pp. 1132–1137, 2004.
- [24] S. Dhokkar, B. Serio, J. Hunsinger, P. Lagonotte, C. Gorecki, A. Asundi, and W. Osten, "Thermal Characterization of Power Transistors by Close Infrared Thermography Method," *Proceedings of Society of Photo-optical Instrumentation Engineers*, vol. 6188, pp. 1E.1–1E.10, 2006.
- [25] [Online]. Available: http://www.microscan.eu.com/projects/pr_16.jsp
- [26] A. Herchang, J. JiinYuh, and Y. Jer-Nan, "Local Heat Transfer Measurements of Plate Finned-tube Heat Exchangers by Infrared Thermography," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, no. 9, pp. 4069–4078, September 2002.

- [27] *Engineers Relay Handbook – 6th edition.* Relay and Switch Industry Association, 2006.
- [28] M. Gedeon, “Size Reduction,” Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 1.3, September 1999.
- [29] P. Slade, Ed., *Electrical Contacts: Principles and Applications.* Marcel Dekker Inc., 1999.
- [30] R. E. Colin, “Material Properties Affecting Electrical Switch Design,” Ph.D. dissertation, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1977.
- [31] M. Gedeon, “Connector Temperature Rise,” Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 3.5, May 2001.
- [32] —, “Current Carrying Capacity,” Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 3.6, June 2001.
- [33] B. Belin, *Uvod u teoriju električnih sklopnih aparata.* Školska knjiga, Zagreb, 1987.
- [34] L. Morin, N. B. Jemaa, and D. Jeannot, “Make Arc Erosion and Welding Study,” *IEEE Trans. on Component, Packaging and Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 240–245, 2000.
- [35] J. McBride and S. Sharkh, “The Influence of Contact Opening Velocity on Arc Characteristics,” in *Proc. of 16th International Conference on Electrical Contacts*, England, September 1992, pp. 395–400.
- [36] N. B. Jemaa, “Contacts Conduction and Switching in DC Levels,” in *Proceedings of the Forty-Eight IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Orlando, USA, 2002, pp. 1–15.
- [37] M. Gedeon, “Fretting Corrosion,” Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 4.3, March 2002.
- [38] —, “Creep Corrosion and Pore Corrosion,” Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 4.5, May 2002.
- [39] R. S. Mroczkowski, *Electric Connector Handbook: Technology and Applications.* McGraw-Hill, 1998.
- [40] A. Sun, H. Moffat, D. Enos, and C. Glauner, “Pore Corrosion Model for Gold-Plated Copper Contacts,” in *Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Chicago, Illinois, USA, September 2005, pp. 232–237.
- [41] T. Ito, M. Matsushima, K. Takata, and Y. Hattori, “Factors Influencing the Fretting Corrosion of Tin Plated Contacts,” in *Proceedings of the Fifty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Montreal, Canada, September 2006, pp. 267–272.
- [42] N. Aukland and H. Hardee, “Improving Fretting Performance of Tin-Lead Contacts,” *Connector Specifier*, vol. 3, pp. 10–12, 1999.

- [43] J. McBride, "Developments in Fretting Studies applied to Electrical Contacts," in *Proceedings of the Fifty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Montreal, Canada, September 2006, pp. 170–180.
- [44] D. Smith and F. Fickett, "Low Temperature Properties of Silver," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 100, p. 169, 1995.
- [45] W. Weibull, "A Statistical Representation of Fatigue Failures in Solids," *Trans. of Royal Institute of Technology, Sweden*, no. 27, 1949.
- [46] S. Heikkinen, "Fatigue of metals; Copper alloys," in *Proc. of CLICK Meeting*. Switzerland: CERN, 2003.
- [47] M. Gedeon, "Cumulative Effects of Tolerances on Connector Performance - Part 1," Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 2.1, January 2000.
- [48] —, "Cumulative Effects of Tolerances on Connector Performance - Part 2," Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 2.2, February 2000.
- [49] C. Turner, "Modern Trends in Contact Material Development," *IEE Colloquium on Electrical Contacts*, vol. 4, pp. 6/1–6/2, 1989.
- [50] M. Gedeon, "Why Good Designs Fail?" Brush Wellman Engineering Materials, Technical Tidbit 1.2, August 1999.
- [51] —, "Elastic Modulus," Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 6.2, March–April 2005.
- [52] —, "Stress Relaxation and Creep," Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 2.6, June 2000.
- [53] —, "Factors Affecting Stress Relaxation," Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 2.7, July 2000.
- [54] C. Weaver and G. Newey, Eds., *Materials: Principles and Practice*. The Open University, London, 1990.
- [55] M. Gedeon, "Material Yielding," Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 2.8, August 2000.
- [56] —, "Grain Size and Material Strength," Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 2.9, September 2000.
- [57] —, "Strain Hardening and Strength," Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 2.11, November 2000.
- [58] J. Davis and et al., Eds., *ASM Handbook: Volume 2, Properties and Selection: Non-ferrous Alloys and Special-Purpose Material*. ASM International, Materials Park, 1990.
- [59] W. Hosford and R. Caddell, *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. Prentice-Hall Inc., 1983.

- [60] M. Gedeon, "Strain Hardening and Formability," Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 6.5, November–December 2005.
- [61] —, "Bend Testing vs. Forming Reality," Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 2.4, April 2000.
- [62] J. Gubicza, A. Juhasz, P. Tasnadi, P. Arato, and G. Voros, "Determination of the Hardness and Elastic Modulus from Continuous Vickers Indentation Testing," *Journal of Material Science*, vol. 31, pp. 3109–3114, 1996.
- [63] S. Fee and Tobolski, *ASM Handbook: Volume 8*. ASM International, 1985, ch. Hardness Testing, pp. 69–113.
- [64] [Online]. Available: <http://www.hsmetal.co.kr>
- [65] J. Whitley, "The Tin Commandments," *Plating and Surface Finishing*, vol. 68, no. 10, pp. 38–39, 1981.
- [66] F. Reidenbach, Ed., *ASM Handbook: Volume 5: Surface Engineering*. ASM International, Materials Park, 1994.
- [67] J. Edwards, *Coating and Surface Treatment Systems for Metals: A Comprehensive Guide to Selection*. Finishing Publications Ltd. and ASM International, 1997.
- [68] [Online]. Available: <http://www.amidoduco.com/cm.html>
- [69] [Online]. Available: <http://www.taling.com.tw>
- [70] [Online]. Available: <http://www.tanaka-precious.com>
- [71] [Online]. Available: <http://www.mallory.com>
- [72] [Online]. Available: <http://www.brainin.com/contactmaterials.cfm>
- [73] [Online]. Available: <http://www.choksiheraeus.com>
- [74] W. Johler, "The Design Challenges Involved in Miniaturization of Electromechanical Relays," in *Proceedings of the Fifty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Montreal, Canada, September 2006, pp. 151–152.
- [75] J. Song, C. Helmig, J. Feye-Hohmann, and A. Schulz, "Bending Test of Contact Materials," in *Proceedings of the Fifty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Montreal, Canada, September 2006, pp. 207–210.
- [76] [Online]. Available: http://www.norstaninc.com/images/sub/workmanship_manual/wsb300.pdf
- [77] [Online]. Available: <http://www.tecc.com.tw/index.htm>
- [78] "Proizvodnja elektroenergetskih kontakata," Ei Holding Co., DO "Ei Komponente", Tech. Rep., 2000.
- [79] M. Gedeon, "Round vs. Rectangular Cross Sections," Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 3.12, December 2001.

- [80] —, “Material Property Directionality,” Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 3.10, October 2001.
- [81] —, “The Importance of Contact Force,” Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 1.6, December 1999.
- [82] —, “Cantilever Beams – Part 2 – Analysis,” Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 3.3, March 2001.
- [83] —, “Cumulative Stress and Bauschinger Effect,” Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 1.4, October 1999.
- [84] —, “Reliability and End-of Life Contact Force,” Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 1.5, November 1999.
- [85] —, “Elastic Resilience,” Brush Wellman Engineered Materials, Technical Tidbit 3.4, April 2001.
- [86] C. Bernauer, T. K. an V. Behrens, and T. Honig, “Substitution of Silver/Cadmium oxide in High Voltage Disconnectors,” in *Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Chicago, Illinois, USA, September 2005, pp. 42–47.
- [87] *Ansys 8.0, Inc. Theory Reference.*
- [88] [Online]. Available: <http://www.thermtrol.com>
- [89] *NEC–Thermal Cutoff SEFUSE Data Sheet.*
- [90] J. Rigdeon, *Macmillan Encyclopedia of Physics.* Simon & Schuster, 1996.
- [91] S. W. Yoon, B.-S. Rho, H. M. Lee, C.-U. Kim, and B.-J. Lee, “Investigation of the Phase Equilibria in the Sn-Bi-In Alloy System,” *Metallurgical & Materials Transactions A*, vol. 30, no. 6, pp. 1503–1516, 1999.
- [92] [Online]. Available: <http://www.aimspecialty.com/fusible-alloys.html>
- [93] [Online]. Available: <http://www.alchemycastings.com/lead-products/fusible.htm>
- [94] [Online]. Available: http://www.gselectronic.de/AIM-Specialty_Materials.htm
- [95] [Online]. Available: <http://www.indium.com/products/tableofalloys.xls>
- [96] O. Degtyareva, V. Degtyareva, F. Porsch, and W. Holzapfel, “Phase Transitions Under High Pressure in Binary Sn Alloys (with In, Hg and Ga),” *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 14, pp. 389–406, 2002.
- [97] T. Hatchard, J. Dahn, S. Trusslera, M. Fleischauer, A. Bonakdarpour, J. Mueller-Neuhaus, and K. Hewitt, “The Amorphous Range in Sputtered Si–Al–Sn Films,” *Thin Solid Films*, vol. 443, pp. 144–150, 2003.
- [98] E. Specht, A. Rar, G. Pharr, E. George, P. Yschack, H. Hong, and J. Ilavsky, “Rapid Structural and Chemical Characterization of Ternary Phase Diagrams using Synchrotron Radiation,” *Journal of Material Research*, vol. 18, no. 10, pp. 2522–2127, 2003.

- [99] G. Vassilev, "Application of Diffusion Couple Technique for the Determination of the Ti–Bi–Sn Phase Diagram," *Crystal Research and Technology*, vol. 40, no. 7, pp. 713–718, 2005.
- [100] *Phase Equilibria Diagrams*, CD ed., ACerS-NIST. [Online]. Available: <http://www.ceramics.org/phasecd>
- [101] P. Villars, A. Prince, and H. Okamoto, Eds., *Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams*. ASM International, 1995.
- [102] D. Živković, D. Manasijević, D. Marković, B. Marjanović, M. Gorgievski, and I. Borisov, "Predviđanje termodinamičkih karakteristika i karakterizacija nekih legura u ternarnom sistemu Pb-Bi-In," *TEHNIKA*, vol. 14, no. 4, pp. R6–R10, 2005.
- [103] U. Kattner, "The Thermodynamic Modeling of Multicomponent Phase Equilibria," *Journal of Materials*, vol. 49, no. 12, pp. 14–19, 1997.
- [104] [Online]. Available: <http://www.mtm.kuleuven.be/Research/THERMO/phase/calphad.html>
- [105] [Online]. Available: <http://www.sgte.org>
- [106] [Online]. Available: <http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation>
- [107] [Online]. Available: <http://www.esm-software.com/factsage>
- [108] [Online]. Available: <http://www.thermocalc.com>
- [109] [Online]. Available: <http://www.npl.co.uk/mtdata>
- [110] H. Lukas, J. Weiss, and E. Henig, "Strategies for the Calculation of Phase Diagrams," *CALPHAD*, vol. 6, pp. 229–251, 1982.
- [111] S. L. Chen, F. Zhang, S. Daniel, F. Y. Xie, X. Y. Yan, Y. A. Chang, R. Schmid-Fetzer, and W. A. Oates, "Calculating Phase Diagrams Using PANDAT and PanEngine," *Journal of Materials*, no. 12, pp. 48–51, 2003.
- [112] [Online]. Available: <http://www.computherm.com/pandat.html>
- [113] S. L. Chen, S. Daniel, F. Zhang, Y. A. Chang, W. Oates, and R. Schmid-Fetzer, "On the Calculation of Multicomponent Stable Phase Diagrams," *Journal of Phase Equilibria*, vol. 22, no. 4, pp. 373–378, 2001.
- [114] S. W. Yoon and H. M. Lee, "A Thermodynamic Study of Phase Equilibria in the Sn-Bi-Pb Solder System," *CALPHAD*, vol. 22, no. 2, p. 167–178, 1998.
- [115] N. David, K. E. Aissaoui, J. Fiorani, J. Hertz, and M. Vilasi, "Thermodynamic Optimization of the In-Pb-Sn System Based on New Evaluations of the Binary Borders In-Pb and In-Sn," *Thermochimica Acta*, vol. 413, no. 413, pp. 127–137, 2004.
- [116] [Online]. Available: <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/bipbsn.html>
- [117] M. Kamal, S. Mazen, A. El-Bedivi, and E. Kashita, "Characterization of Bismuth–tin–lead and Bismuth–tin–lead–cadmium Fusible Alloys," *Radiation Effects and Defects in Solids*, vol. 160, pp. 369–375, 2005.

- [118] [Online]. Available: <http://www.bayermaterialssciencenafta.com/products>
- [119] [Online]. Available: <http://zierick.com/pdf/materials.pdf>
- [120] C. Lasance, "The Influence of Various Common Assumptions on the Boundary-Condition-Independence of Compact Thermal Models," *IEEE Trans. on Component and Packaging Technologies*, vol. 27, no. 3, pp. 523–529, 2004.
- [121] C. Popiel and J. Wojtkowiak, "Experiments on Free Convective Heat Transfer from Side Walls of a Vertical Square Cylinder in Air," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 29, no. 12, pp. 1–8, 2004.
- [122] [Online]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html
- [123] [Online]. Available: <http://www.dowcorning.com>
- [124] S. Schlesinger, *Infrared Technology Fundamentals*. Dekker-Verlag, New York und Basel, 1989.
- [125] *Theoretical and Practical Aspects of Infrared Thermography*, Jenoptic L.O.S., GmbH, 2001.
- [126] H. Young and R. Freedman, *University Physics with Modern Physics*, 10th ed. Addison Wesley, 1999.



Универзитет у Нишу
Универзитетска библиотека

Овај текст је део Дигиталног репозиторијума, јавно је доступан, и може се слободно користити за личне потребе, у образовне и научне сврхе. Ако користите текст, наведите извор.

Комерцијална употреба текста није дозвољена.

University of Niš
University Library

This text is a part of the Digital repository of public domain. Permission is granted for personal, educational and scientific use. If you do use the document, indicate the source.

No permission is granted for commercial use.

