

POJAVI NA TALILNEM ELEMENTU VAROVALKE V TALILNI FAZI IZKLOPA

THE PHENOMENA CONTROLLING THE MELTING PHASE OF A FUSE ELEMENT DURING A BREAK

Martin Bizjak*, Janez Kovač¹, Mitja Koprivšek²

*Sv. Duh 275, 4220 Škofja Loka, Slovenija

¹Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, Ljubljana, Slovenija

²ETI, d. d., Obrezija 5, 1411 Izlake, Slovenija
b.martin@siol.net

Prejem rokopisa – received: 2003-10-27; sprejem za objavo – accepted for publication: 2004-02-09

Na talilnem vložku varovalke za nazivni tok 63 A je bil izveden preskus izklopa toka 100 A. V teh razmerah pride do prekinitve toka v varovalki med *talilno fazo*, ko se na talilnem elementu stalijo perforirani segmenti na prekinitvenih mestih, kjer je nanosena plast nizekotljive zlitine. Po preskusu je bil talilni element preiskan z optično mikroskopijo, metalografijo, elektronsko mikroskopijo in elektronsko mikroanalizo. Za presojo rezultatov so bili uporabljeni binarni diagrami za pare Cd – Sn, Cu – Sn in Cd – Cu. Ugotovljeni so bili vzroki, ki včasih usmerijo potek izklopa v *podaljšano* talilno fazo, namesto da bi se končal z *normalno*, v kateri učinki izklopa niso nevarni za bližnjo okolico. Kako te vzroke odpraviti s spremembo konstrukcije talilnega elementa ali tehnologijo izdelave, je pomembno za proizvajalca varovalk.

Ključne besede: izklop toka, talilni element, talilna faza, raztapljanje v nizekotljivi zlitini, metalografija, binarni fazni diagram, Cu – Sn

Test samples of melting fuses rated for a current of 63 A were subjected to tests with a breaking current of 100 A, where the melting of the fuse element is the principal process of current interruption. Particular sites of the fuse element strip, notches, are coated with an alloy with a low melting point and in this way they enable the break of the overcurrent by melting and dissolving the base Cu strip. The investigation of the fuse elements was performed after the break tests and involved optical microscopy, metallography, SEM and EDX microanalysis of the chemical composition. Results were analyzed using binary diagrams of Cd-Sn, Cu-Sn and Cd-Cu. The effects of phenomena which occasionally prolong the melting process were investigated in order to reduce excessive heating of the fuse link during the break. As a prolonged type of melting phase could be thermally harmful to the adjacent plastic parts of insulation, measures to avoid it are important for the design of the fuse element and its manufacturing technology.

Key words: break of electric current, fuse element, melting phase, dissolution in Sn-alloy, metallography, binary diagram, Cu-Sn alloy

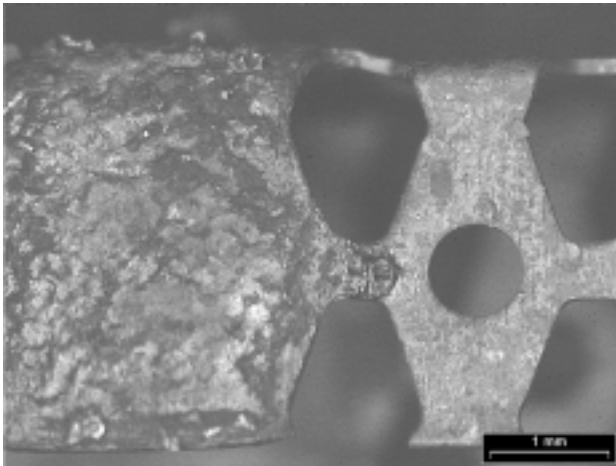
1 UVOD

Talilna varovalka kot zaščitni element električnega tokokroga skrbi za to, da zaradi napake v tokokrogu prevelik tok ne bi poškodoval električnih naprav ali vodnikov. Pri toku, ki je večji od nazivnega toka varovalke, mora talilni vložek pregoreti v predpisanem času, ki ustreza izklopni karakteristiki za dani tip in nazivne vrednosti varovalke, kot zahteva ustrezni standard ¹.

V talilnem vložku varovalke je talilni element, to je tanek perforiran bakreni trak z več zaporednimi segmenti, na katerih so zoženi prehodi za električni tok. Ti so prekinitvena mesta pri izklopu z varovalko ². Na enem od segmentov talilnega elementa je ob zožitvah nanos nizekotljive zlitine, ki ima značilnosti spajke in katere tališče je precej nižje od tališča perforiranega traku. Pri pojavu nadtoka se prekinitvena mesta segrevajo z eksponentialnim časovnim potekom do tališča spajke, kar imenujemo *faza segrevanja*. Raztaljena zlitina začne raztapljati trak talilnega elementa, predvsem na zožitvah, ta začetni proces pa imenujemo *talilna faza*. Njen začetek je prikazan na **sliki**

1, kjer področje, ki je na talilnem elementu pokrito z nizekotljivo zlitino, zapolnjuje levo polovico do roba perforacije. Ta zlitina je začela raztapljati Cu-trak na zoženem prehodu v sosednji segment perforacije, kar je videti kot površinska tvorba na zožitvi talilnega elementa. Prikazano stanje na **sliki 1** je začetek talilne faze, ki se ni razvila naprej zaradi predčasne prekinitve preskusa. Pri prekinitvi toka z varovalko se talilna faza zaključi s stalitvijo zožitve, kjer se staljena kovinska zveza prekine in s tem se prekine tudi električni tok. Nastala talina je raztopina bakra v nizekotljivi zlitini. Površinska napetost pretrga staljeni mostič, oba konca pa razmakne in oblikuje v kapljičaste tvorbe. Tako je tokokrog na talilnem elementu prekinjen.

Stanje talilnega elementa, na katerem je bila v celoti opravljena talilna faza, s katero je bil tok uspešno prekinjen, je prikazano na **sliki 2**. Spajka, ki je bila v obliki traku nanosena tik ob perforaciji (na sliki je področje spajke v desni tretjini), se je v procesu izklopa stalila in se razlila po zoženih prehodih med segmenti perforacije. Na njeni površini se vidijo v talino vtisnjena zrna kremenovega peska, ki v talilnem vložku obdaja cel talilni element. Na zoženih mestih ob nanosu nizko-

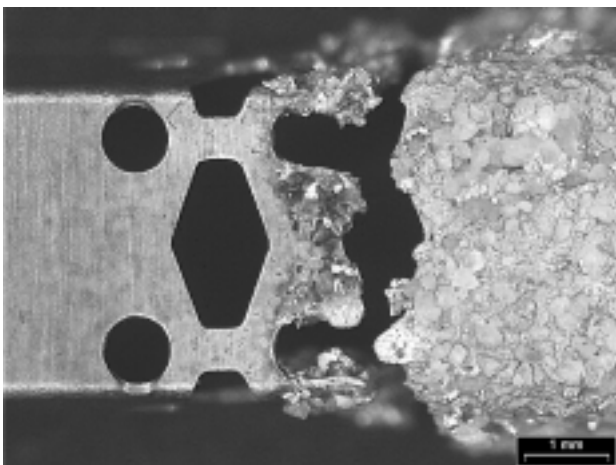


Slika 1: Začetek raztapljanja zožitev na perforaciji talilnega elementa pri nastopu talilne faze; segment z nanosom nizekotaljive zlitine je prikazan na levi strani slike.

Figure 1: The onset of the melting phase by dissolving the notches of the fuse element. The area coated by the low-melting-point alloy occupies the left hand side of the photograph.

taljive zlitine se je bakreni trak talilnega elementa v njej že delno raztopil. S slike so razvidna prekinitvena mesta ob zgornjem in spodnjem robu talilnega elementa, kjer se je stik med segmentom z nanosom nizekotaljive zlitine in segmentom z golim bakrenim trakom fizično prekinil.

Trajanje talilne faze je glede na izklopni čas varovalke kratko, vendar se v njej sprosti precej toplote. Ta se absorbira v pesku in keramičnem telesu talilnega vložka, ki se na površini navadno pri izklopu segreje do temperature, ki jo brez nevarnosti za poškodbe vzdržijo tudi plastični deli v neposredni bližini. Včasih pa se trajanje talilne faze podaljša, med tem pa se sprošča tudi večja toplotna moč. Ta vrsta talilne faze se imenuje



Slika 2: Talilni element po izklopu s talilno fazo; z nizekotaljivo zlitino je pokrit desni del elementa, na katerem se vidijo vgnezdjena zrna peska.

Figure 2: Fuse element broken due to the interruption of the current by the melting phase. The right-hand part of the fuse element is coated with low-melting-point alloy, where the grains of quartz sand are embedded in its surface

podaljšana, nasprotno od krajše, ki se imenuje *normalna*. Pri izklopu s podaljšano talilno fazo se keramično telo talilnega vložka segreje na tako visoko temperaturo, da lahko resno poškoduje sosednje plastične dele, uniči izolacijo med sosednjimi tokokrogi, povzroči kratek stik in podobno. Za proizvajalca in uporabnika talilnih varovalk je zato pomembno raziskati vzroke za nastanek podaljšane talilne faze in poiskati ukrepe, ki bodo zagotovili izklop z normalno talilno fazo.

V ta namen smo na talilnih vložkih varovalke za nazivni tok 63 A preiskali pojave pri izklopu preskusnega toka 100 A. V skladu z izklopno karakteristiko varovalke je v teh preskusnih razmerah pričakovan izklopni čas do 1 ure. Podaljšana talilna faza namreč načelno ne vpliva na izklopni čas varovalke. Iz rezultatov električnih meritev smo razpoznali vrsto talilne faze. Vložke smo po preskusu izklopa preiskali z metalografskimi in mikroanalitskimi metodami s ciljem, da se s primerjavo talilnih vložkov obeh vrst talilne faze odkrije vzroke za njeno podaljšanje.

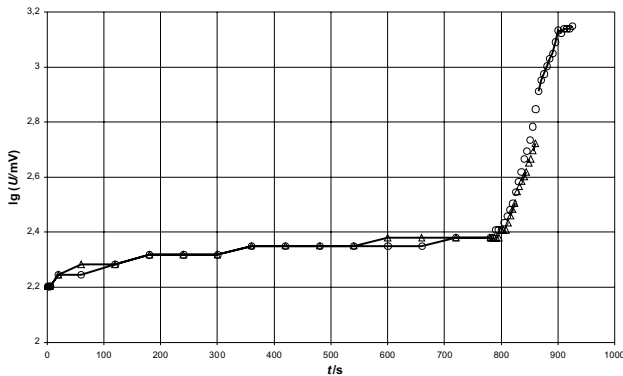
2 EKSPERIMENTALNO DELO

Preiskali smo pojave v talilnih vložkih varovalke D02 63A z nazivnim tokom 63 A, ki smo jih med preskusom izklopa obremenili s tokom 100 A iz stabiliziranega vira enosmernega toka. Talilni element je izdelan iz traku elektrolitskega bakra, na srednjem segmentu perforacije je nanosena nizekotaljiva zlitina SnCd20, talilni element pa je vložen v keramično telo, kjer ga obdaja kremenov pesek. Med preskusi izklopa smo izvedli meritve časovnega poteka električne napetosti med priključki talilnega vložka pri 100 A. Vsak talilni vložek smo po preskusu izklopa pazljivo odprli, talilni element skrbno izvlekli iz keramičnega telesa, da se ne bi poškodoval, ter z njega previdno odstranili vtisnjena zrnca kremenovega peska. Prekinitvena mesta smo slikali v optičnem mikroskopu. Pripravili smo tudi metalografski obrus prekinitvenega mesta in v optičnem metalografskem mikroskopu preiskali mikrostrukturo. Kvalitativno in semi-kvantitativno analizo kemijske sestave vzorcev smo izvedli v vrstičnem elektronskem mikroskopu JEOL JSM-45 z elektronsko mikroanalizo. Na različnih mestih smo posneli energijsko disperzijske spektre vzbujenih rentgenskih žarkov (EDX) z analizatorjem TRACOR TN 2000.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Analiza talilnega elementa po izklopu

Slika 3 prikazuje potek električne napetosti med priključki talilnega vložka kot funkcije časa med preizkusom izklopa od trenutka vključitve preskusnega toka do njegove prekinitve. Na sliki lahko razločimo *fazo segrevanja*, kjer napetost zaradi segrevanja talilnega elementa in naraščanja njegove ohmske upornosti počasi eksponentno narašča, ter *talilno fazo*, kjer napetost



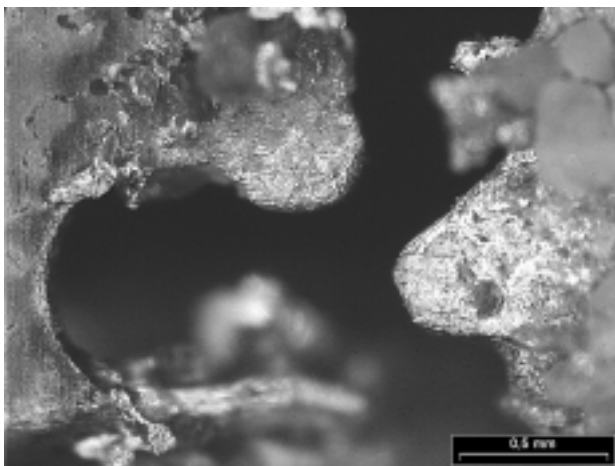
Slika 3: Časovni potek napetosti pri izklopu z normalno (oznaka "o") in podaljšano (oznaka "Δ") talilno fazo

Figure 3: Time-varying voltage drop during the break with a normal (label "o") and with a prolonged (label "Δ") melting phase

strmo narašča do neke končne vrednosti, pri kateri se tok prekine. Na **sliki 3** je prikazan potek napetosti na dveh preizkušancih istega tipa, od katerih je eden izklopil z normalno talilno fazo, drugi pa s podaljšano. Do prehoda v podaljšano talilno fazo je časovni potek napetosti na obeh preskušancih skoraj enak, tako da se razlikujeta le v trajanju talilne faze in v velikosti napetosti, ki je dosežena pri prekinitvi toka.

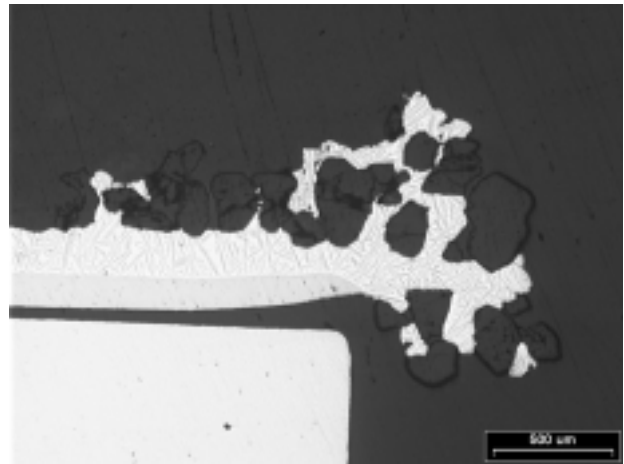
3. 1. 1 Izklop z normalno talilno fazo

Značilen videz talilnega elementa po izklopu z *normalno* talilno fazo, ki je opisana že v prejšnjem razdelku, je prikazan na **sliki 2**. Tokovne poti so prekinjene le na najožjnjih delih perforacije na prehodu od segmenta s plastjo spajke do neospajkanega segmenta. **Slika 4** prikazuje izrez **slike 2** okrog prekinitvenega mesta. Vidni so le še staljeni ostanki zožitve na prekinitvenem mestu, na katerih opazimo površinsko mikrostrukturo



Slika 4: Prekinitveno mesto na talilnem elementu z ostanki zožitve po raztapljanju v nizkotaljni zlitini (svetlo področje); ob levem robu slike je prikazan Cu-trak brez znakov raztapljanja.

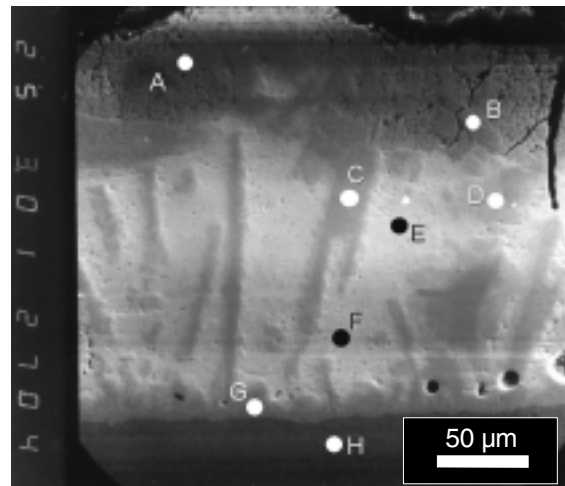
Figure 4: Interrupting site of the fuse element with a remnant of the notch after dissolution in the low-melting-point alloy (bright area). The narrow area at the left hand edge belongs to the uninfluenced copper strip



Slika 5: Metalografski prerez prekinitvenega mesta z zrnji peska, oblitimi z zlitino Cu in nizkotaljive zlitine

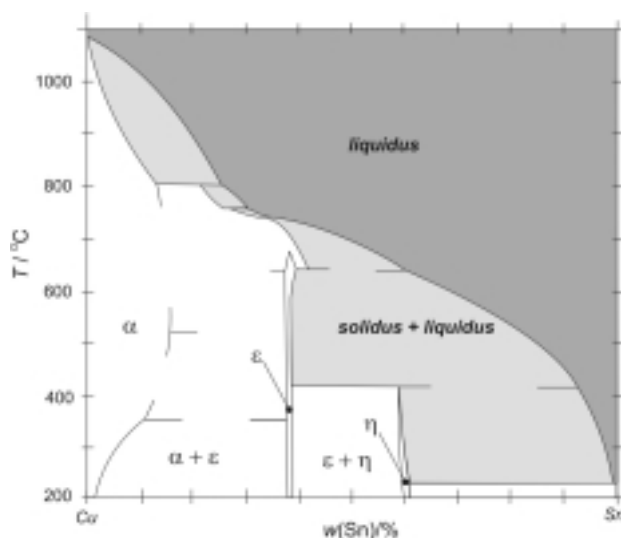
Figure 5: Metallographic structure of the interrupting site shown on cross-section with quartz grains embedded in the alloy copper and low-melting point alloy

zlitine, ki je nastala iz nizkotaljive zlitine in bakra osnovnega traku talilnega elementa. Prerez tega področja talilnega elementa ob prekinitvenem mestu z mikrostrukturo prikazuje **slika 5**. Spodnja plast (levo na **sliki 5**) je del traku talilnega elementa iz Cu (temnejši odtenek). Nad njo je nanos nizkotaljive zlitine (svetlejši odtenek). Oboje je še skoraj v začetni debelini in proti desni prehaja v območje prekinitvenega mesta. Kovina, prikazana na spodnji levi polovici slike, je nosilec vzorca iz medi. Mikrostruktura zlitine v nanoseni plasti se razlikuje od originalne. V njej je igličasta faza, ki kaže na to, da je prvotno nanosena zlitina že precej legirana s Cu. V območju prekinitvenega mesta je osnovni Cu-trak že po vsej debelini raztopljen. Na sliki so kot temnejša polja vidna na površini ugnezdena zrna kremenovega



Slika 6: Mesta meritev kemične sestave snovi po prerezu prekinitvenega mesta; SEM- posnetek s sekundarnimi elektroni

Figure 6: Points used for the microanalysis of the chemical composition across the cross-section of the interrupting site. SEM picture using secondary electrons



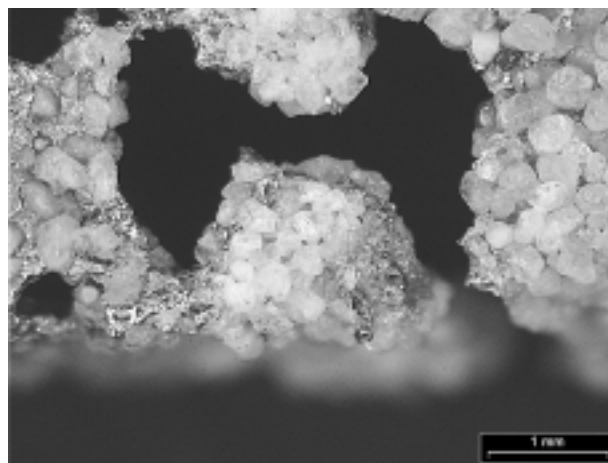
Slika 7: Ravnotežni binarni fazni diagram kovin bakra in kositra
Figure 7: Stationary-state binary diagram of copper and tin

peska iz talilnega vložka, od katerih so nekatera oblita z nastalo zlitino Cu in SnCd. Po vsem staljenem volumnu najdemo enakomerno porazdeljeno igličasto (ali mogoče listasto) fazo oblike, ki je tudi v mikrostrukturi pretaljene površine na prekinitvenem mestu.

Slika 6 je dobljena v elektronskem mikroskopu s sekundarnimi elektroni in prikazuje prečni prerez prekinitvenega mesta po izklopnem preskusu. Z elektronsko mikroanalizo smo v točkah A-H določili kemično sestavo. Točka H leži na traku talilnega elementa iz Cu. Srednje, svetlejše področje je staljeni volumen spajke, ki vsebuje precej Cu iz talilnega elementa, ostalo pa je Sn. V igličasti fazi (točka C), ki vsebuje le Cu in Sn, je masni delež Cu > 50 %, v okoliški svetlosivi masi (točki E in F) pa je Cu < 50 %. Cd iz nizkotaljive zlitine ni prisoten v zlitini s Cu, najdemo pa ga v vrhnji porozni plasti z nekaj Sn (točka A).

Mikrostruktura na prekinitvenem mestu ne kaže, da bi med zlitino v nanoseni plasti in talilnim elementom potekala difuzija v trdnem. Mislimo, da tudi sicer difuzija v trdnem zaradi kratke talilne faze in nizke temperature ne bi imela pričakovanega učinka ³.

Razmere na prekinitvenem mestu v trenutku prekinitve električnega toka lahko približno ocenimo iz "zamrznjene" mikrostrukture in rezultatov mikroanalize (**sliki 5 in 6**). Glede na vsebnost Sn in Cu v talini prekinitvenega mesta in odsotnost Cd lahko poiščemo razlago za pojave v talilni fazi izklopa varovalke z uporabo ravnotežnega binarnega sistema kovin Cu in Sn ⁴. Binarni fazni diagram Cu – Sn je prikazan na **sliki 7**. Predvsem je za razlago talilne faze varovalke pomembna temperatura na mejah *solidus* in *liquidus*. Najnižja je pri skoraj čistem Sn (~230 °C) in se zvezno veča z naraščanjem vsebnosti Cu v sistemu Cu – Sn do tališča Cu pri 1083 °C z vsebnostjo Sn → 0. Pri tem se tvorijo faze različne kemične sestave. Igličasti ali listasti delci



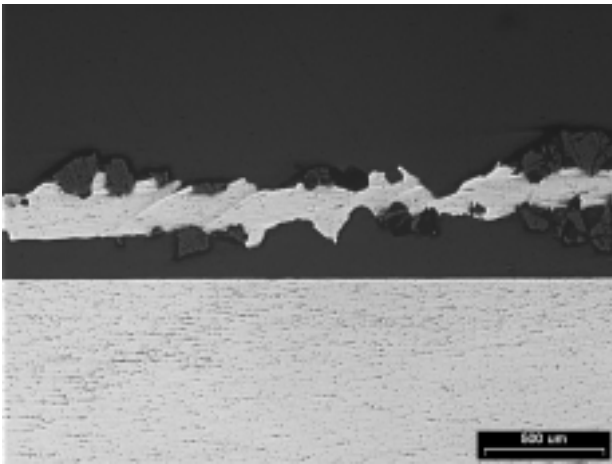
Slika 8: Talilni element po izklopu s podaljšano talilno fazo
Figure 8: Fuse element after break with prolonged melting phase

verjetno pripadajo fazi ϵ s sestavo, izraženo v masnih deležih Cu 63 % in Sn 37 %, ki je obstojna do največ 670 °C. Pri manjši vsebnosti Cu < 40 % obstaja še faza η , ki je v stacionarnih razmerah obstojna največ do 415 °C, v dinamičnih razmerah izklopa toka pa je verjetno opazna kot tanka ovojnica okoli iglaste faze ϵ . Na meji s Cu- trakom talilnega elementa se verjetno kaže še plast faze α s Cu > 90 % in visokim tališčem.

Pri prekinitvi toka z *normalno* talilno fazo je zlitina Cu in SnCd v stanju, ki mu v binarnem faznem diagramu pripada območje nekje v sredini področja "*epsilon + liquidus*". Na **sliki 7** je v svetlo sivem polju "*solidus + liquidus*" desno od ozkega območja trdne faze ϵ in je omejeno s temperaturo 416 °C in 640 °C, kjer je vsebnost Cu < 30 %. Pri večji vsebnosti Cu se stanje premika proti meji faze ϵ , kjer je zaradi pomanjkanja taline prekinitve talilnega elementa otežena.

3. 1. 2 Izklop s podaljšano talilno fazo

Slika 8 prikazuje vzorec talilnega elementa, pri katerem je bil ugotovljen izklop s *podaljšano* talilno fazo. Območje prekinitvenih mest je razvlečeno preko več segmentov perforacije, lahko celo preko vseh. Prvotnega videza talilnega elementa in razporeda perforiranih segmentov se ne da več razpoznati, kot je to razvidno s **slike 8**. Vzdolž talilnega elementa je nastalo dolgo območje zlitine iz nanosa in bakra, na katerem so z zlitino oblita zrna kremenovega peska, ki tvorijo skoraj že debelo stekleno prevleko. Mikrostruktura prekinitvenega območja je prikazana na vzdolžnem prerezu talilnega elementa na **sliki 9**. S slike je razvidno, da je talilni element po vsej dolžini perforacije odtaljen do te mere, da so se v njem globoko ugneznila zrna kremenovega peska, ki ga obdajajo v talilnem vložku. Z optičnim metalografskim mikroskopom smo razločili le dve metalurški fazi, ki se rahlo razlikujeta v rumenih odtenkih (na **sliki 9** se razlik v barvnih odtenkih ne razloči). Prehod v področje s čistim Cu je neoster in se razloči le po odtenku za nelegiran Cu. Verjetna metalo-



Slika 9: Metalografski prerez vzdolž talilnega elementa s podaljšano talilno fazo

Figure 9: Cross-section of fuse element broken with prolonged melting phase

grafska struktura tega dela talilnega elementa je zmes faze α in faze ϵ (Glej binarni fazni diagram sistema Cu – Sn na **sliki 7.**) z masnim deležem Cu > 70 %. Iz binarnega diagrama za Cu – Sn sklepamo, da se je prekinitev kovinskih povezav v talilnem elementu med stalitvijo lahko izvedla na meji " α + liquidus" pri temperaturi nad 800 °C. Na to temperaturo se je pri prekinitvi toka moral segreti precej večji volumen talilnega elementa kot v normalni talilni fazi izklopa, kjer je prekinitevno območje omejeno na zožitve enega segmenta perforacije. Iz tega sklepamo, da se je spajka v podaljšani talilni fazi razlezla po precej daljšem odseku talilnega elementa kot v normalni. V nastali zlitini je koncentracija bakra velika in ima ta zato tudi višje tališče.

3.2 Primerjava normalne in podaljšane talilne faze

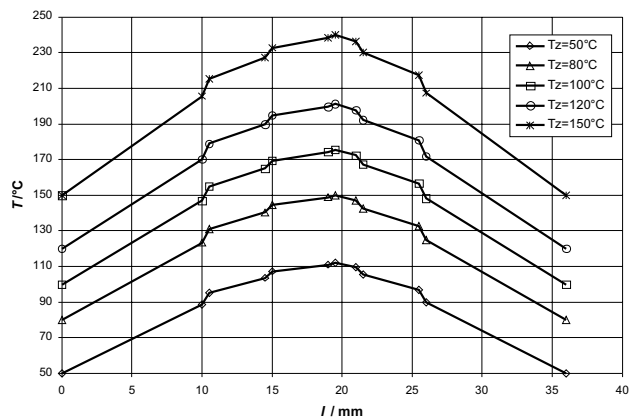
Iz analize rezultatov električnih meritev in metalografskih preiskav na talilnih elementih po izklopu toka z normalno in s podaljšano talilno fazo smo ugotovili, da pride do prekinitve tokovne poti v normalni talilni fazi zaradi stalitve majhnega območja traku talilnega elementa, ki obsega pretežno zožitve na enem segmentu perforacije. Zaradi majhnega volumna Cu-traku, ki se raztopi v dani količini nanosa nizkotaljive zlitine, je vsebnost Cu v nastali zlitini majhna, zato je tudi temperatura zožitev v talilni fazi do trenutka prekinitve talilnega elementa temu ustrezno nizka. Količina toplote, ki je potrebna za prekinitev tokovne poti, je sorazmerna masi, ki jo zajame proces izklopa v talilni fazi, ter njenemu segretju. Če proces prekinitve na prvem segmentu zakasni, se dana količina spajke razleze dalje vzdolž talilnega elementa in raztoplja Cu trak na večji dolžini, dokler se končno talilni element ne prekine. Znatno del talilnega elementa ima v podaljšani talilni fazi precej povečano električno upornost in se segreje tudi do 800 °C. Sproščena toplota se skozi kremenov

pesek prevaja na keramično telo talilnega vložka, ki se lahko segreje celo do žarenja (nad 600 °C).

3.3 Verjetni potek prehoda v podaljšano talilno fazo

V prejšnjem razdelku je bilo ugotovljeno, da se podaljšanje talilne faze sklada z razlitjem nanosa nizkotaljive zlitine preko več segmentov perforacije. Raztapljanje Cu-traku v tej zlitini in razširjanje taline sta sočasna procesa, ki sta odvisna od porazdelitve temperature po talilnem elementu, ter ju usmerjamo k želenemu učinku z izbiro količine in lokacije nanosa nizkotaljive zlitine pri načrtovanju talilnega elementa. Željeno porazdelitev temperature je mogoče doseči z ustrezno porazdelitvijo in oblikovanjem segmentov perforacije na traku talilnega elementa. Za dan talilni element je potek temperature vzdolž tega ocenjen z računsko simulacijo. Posamezni element perforacije smo obravnavali kot električni vodnik s poenostavljeno geometrijo: zožitev kot del traku enakega preseka, del okrog okroglega izseka pa kot obročasti vodnik z enakomerno porazdeljeno gostoto toka po prerezu. Za vsak element perforacije smo izračunali električno upornost. Talilni element smo obravnavali kot zaporedne upore, v katerih se zaradi ohmske upornosti pri toku sprošča toplota. Ta se prevaja po Cu v sosednje elemente in od površine talilnega elementa skozi pesek na keramično telo. To ima neko predpostavljeno površinsko temperaturo, enako po vsej njegovi površini. Iz te temperature, ki je med preskusom merljiva, s simulacijo ocenimo temperaturo posameznih segmentov talilnega elementa. Simulacija je poenostavljen model talilnega vložka, poenostavitev pa bistveno ne prispeva več k napaki rezultatov kot nenatančni podatki o toplotnih lastnostih obravnavanih materialov. Rezultati simulacije so grafično prikazani na **sliki 10.** Podatki o lastnostih materialov so povzeti iz literature ⁵.

Konfiguracijo taline na prekinitvenih mestih določa površinska napetost njene površine. Oblikovanje poteka po načelu zmanjševanja površinske energije ⁶ in glede na



Slika 10: Računalniška simulacija porazdelitve temperature po talilnem elementu

Figure 10: Calculated distribution of temperature along the fuse element

začetno stanje. Zato je mogoč tako potek prekinitve staljenega mostiča na zožitvi s tvorbo kapelj na obeh koncih, ki se drug od drugega razmakneta, kakor tudi tvorba vzdolžnih vzporednih pramenov taline v podaljšani talilni fazi, če to omogočajo začetni pogoji procesa.

4 SKLEPI

Trajanje talilne faze izklopa toka s talilnim vložkom je odvisno od poteka raztapljanja zožitev na perforaciji talilnega elementa z nanosom spajke. Neželeni pojav *podaljšane* talilne faze odpravimo z omejitvijo razlivanja spajke po talilnem elementu. Na prekinitvenih mestih naj pri nadtoku zožitev iz trdnega Cu preide v talino iz nizkotaljive zlitine in kovine talilnega elementa, ki ima čim nižje tališče, ker je s tem zagotovljen način izklopa z *normalno* talilno fazo. Z višjim tališčem se podaljša talilna faza izklopa, kar vodi v večje segrevanje talilnega vložka varovalke, s tem pa se poveča nevarnost ter-

mičnih poškodb ohišij in dodanih komponent, v katere je talilni vložek vstavljen.

Ustrezne začetne pogoje, ki usmerjajo potek talilne faze v *normalno*, v večji meri določajo konstrukcijski parametri talilnega elementa, zagotovimo pa jih s stabilnim in nadzorovanim tehnološkim postopkom v proizvodnji talilnih vložkov.

5 LITERATURA

- ¹ IEC 60269-1 (1998-12), IEC 60269-3-1 (2001-06)
- ² H. Johann: Elektrische Schmelzsicherungen für Niederspannung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982
- ³ P. G. Shewmon: Diffusion in solids, McGraw-Hill, 1963
- ⁴ C. J. Smithells: Metals reference book, Volume II, Butherworths, 1967
- ⁵ G. A. Cividjan et al: Mathematical modelling of thermal processes in vacuum fuses, Fifth Int. Conf. on El. Fuses and their Appl., TU Ilmenau, 1995
- ⁶ R. Kubo: Thermodynamics, North-Holland, Amsterdam, 1968