

KONTAKTNI MATERIALI ZA NIZKONAPETOSTNA STIKALA V ELEKTROENERGETIKI

Martin Bizjak

Iskra MIS d. d., Kranj, Slovenija

Ključne besede: kontaktni pojavi, nizkonapetostna stikala za energetiko, kontaktni materiali za elektroenergetiko, zlitine AgMe, kompoziti Ag/Me, kompoziti Ag/MeO, kompoziti Ag/C, uporaba kontaktnih materialov

Izveček: Učinke kontaktnih pojavov, ki delujejo na električne kontakte v stikalih za nizkonapetostne energetske tokokroge, upoštevamo pri presoji ustreznosti kontaktnega materiala za predvidene specifične pogoje uporabe. Izbiramo pretežno materiale na osnovi bakra in srebra, od teh pa se največ uporabljajo zlitine AgCu in AgNi 0,15, kompoziti Ag s kovinskimi granulati (Ag/Me), z granulati kovinskih oksidov (Ag/MeO) iz z grafitnimi vlakni. Značilni predstavniki Ag/Me materialov so Ag/Ni in Ag/W, od Ag/MeO materialov pa Ag/CdO, pridobljen s postopkom notranje oksidacije in Ag/CdO, Ag/SnO₂ ter Ag/ZnO, pridobljen s postopkom metalurgije prahov. Za odklopnike je zanimiv kompozit Ag/C z pravokotno in vzporedno usmeritvijo grafitnih vlaken. Za te materiale so opisane njihove osnovne električne lastnosti s poudarkom na uporabi v stikalni tehniki, prikazana je njihova metalografska struktura in kratek opis postopkov izdelave. V sklepu je podana ugotovitev, da do sedaj še ni uspelo izdelati univerzalnega kontaktnega materiala za vse pogoje, pri katerih morajo stikalni aparati v energetskih tokokrogih nizke napetosti dolgo in zanesljivo delovati.

Contact materials for low-voltage power switching devices

Key words: electric contact phenomena, low-voltage switching devices, contact materials for low-voltage power conditions, AgMe alloys, composites Ag/Me, composites Ag/MeO, composites Ag/C, application of contact materials

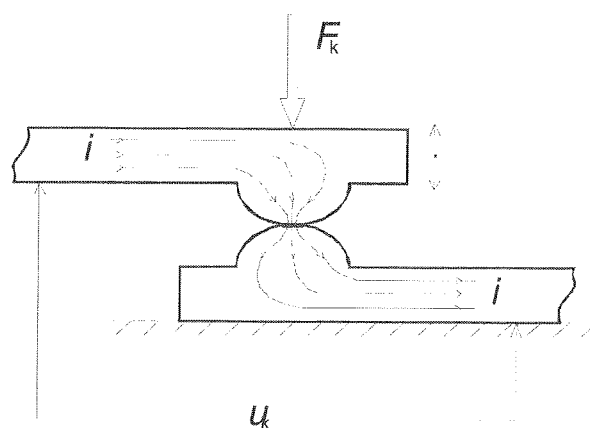
Abstract: Electrical contact phenomena affecting contacts of low-voltage switching devices in power circuits shall be taken into consideration for selection of the suitable contact material regarding the presumed specific conditions of switching operation. The candidates for contact materials are found among copper-base and silver-base materials. Most frequently used are AgCu and AgNi 0,15 alloys, as well as composite materials of Ag with metal granulates (Ag/Me), with metal-oxide granulates (Ag/MeO) and with graphite filaments (Ag/C). Typical materials of Ag/Me composites are Ag/Ni and Ag/W, while among Ag/MeO materials widely used Ag/CdO produced by internal oxidation, as well as Ag/CdO, Ag/SnO₂ and Ag/ZnO produced by powder metallurgy. In circuit breakers frequently used are Ag/C materials having graphite filaments oriented in parallel or perpendicularly to the contact surface. Basic electrical characteristics concerning the application for electrical contacts are described and the metallographic structure is shown as well for the above listed materials. Brief descriptions of manufacturing methods are also given. In the conclusion it is stated that up to now not any contact material has been manufactured yet having universal contact characteristics which provide durable and reliable switching operations of contacts at majority of operating conditions in low-voltage power circuits.

1. Uvod

Če v električnem tokokrogu želimo vključevati in prekinjati električni tok skozi porabnik, lahko to opravimo to enostavno tako, da fizično stikamo in razmikamo med seboj dva električna vodnika. Vendar so se elektrotehniki več desetletij ukvarjali z vprašanjem, kako zagotoviti dolgotrajen zanesljiv stik, zakaj tudi na priključku transformatorja stik lahko odpove, zakaj v stikalu pri kakem od vklopov mehanizma tok ni stekel, zakaj pri izklopu stikala včasih toka ne moremo prekiniti in teče skozenj do uničenja stikala ali komponente tokokroga, ter podobnim, ki so še danes ne tako redka vprašanja vsakdanje prakse v stikalni tehniki. Zato je treba opisati nekatere značilne pojave pri vklopu, prevajanju in izklopu toka z mehansko upravljanimi kontakti.

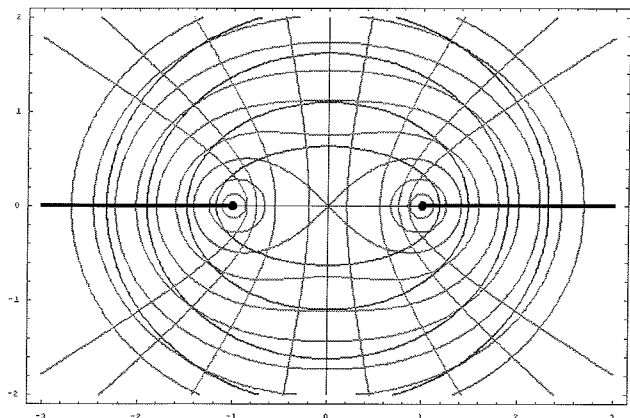
Dva električna vodnika, ki ju staknemo med seboj, da med njima teče električni tok, tvorita kontaktni par. Na stičnih delih, ki so najpogostejše na izpostavljenih delih obeh električnih vodnikov, nastane kontaktno mesto, kjer je električni kontakt med deloma kontaktnega para. V stiku ju drži zunanja sila F_k [N], ki nanju izvaja kontaktni stisk (Sl. 1).

Ta povzroča na kontaktnem mestu deformacijo stičnih površin, tako da je kontaktni par v fizičnem stiku na majhnem delu naležne površine, ki jo določa deformirano po-



Slika 1: Shematični prikaz kontaktnega para v sklenjenem stanju

dročje. Vendar je eksperimentalno ugotovljeno, da v realnih pogojih le majhen del stične površine s ploščino a tudi prevaja električni tok I . Pri prehodu skozi električno prevodno ploskev a se tokovnice električnega toka zelo zgostijo (Sl. 2), kar se na kontaktnem mestu odraža kot upor zožitve R_k [Ω]. Ker kontaktna sila F_k neposredno vpliva na velikost ploskve a , je tudi upor zožitve v neposredni zvezi z R_k . Empirično je ugotovljena splošna relacija (1), ki



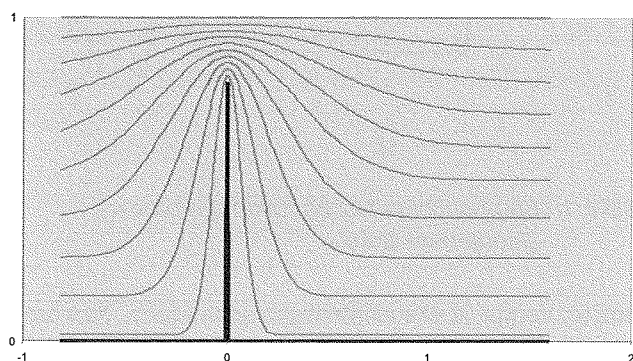
Slika 2: Simulacija razmer na električno prevodnem delu kontaktnega mesta – tokovnice električnega toka (hiperbole), ekvipotenciali (elipse) in izoterme (Cassinijeve jajčnice)

velja dovolj dobro za kontaktni par iz različnih materialov v različnih okoljih in raznih geometrij:

$$R_k = \alpha F_k^{-\beta} \quad (1)$$

kjer so v vrednosti konstante α in eksponenta β upoštevani zgoraj naštetih vplivi. Za vrednost eksponenta se najpogosteje navaja vrednosti $0,3 < \beta < 1/2$. Okoli zožitve se znatno poveča tudi gradient električnega potenciala, zato pretežni del električne napetosti U_k med deloma kontaktnega para pripade razliki potenciala ob stičnem mestu. Zaradi električne upornosti materiala kontaktnega para se sprošča toplota, ki se odvaža po kontaktnih delih in preko okoliškega medija v okolico. Izoterme na stičnem mestu kažejo, da najbolj vroče področje leži na robu električno prevodne ploskve /3/, kar pri vplivu okoliškega medija in tujih plasti na stičnih površinah omejuje dolgoročno stabilnost stika.

Zožitev toka skozi stično mesto povzroča tudi magnetne učinke. Če se snop tokovnic toka I pri prehodu iz preseka s



Slika 3: Zoženje tokovnic električnega toka na čelnem stiku dveh valjastih vodnikov pri prehodu skozi majhno električno prevodno ploskev na osi cilindra, simetrijska os polja tokovnic poteka po zgornjem robu slike

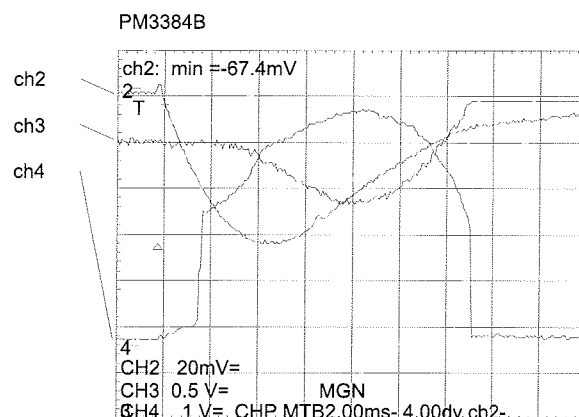
ploščino A zoži na presek s ploščino a (Sl. 3), nastane na zožitvi med vodnikoma odbojna sila F_b , določena z (2) /4/:

$$F_b = C I^2 \ln \left(\frac{A}{a} \right) \quad (2)$$

kjer je empirično ugotovljeno, da za primere običajne prakse velja približna ocena iz (2a):

$$F_b [N] = 0,5 I^2 [kA]^2 \quad (2a)$$

Če odbojna sila F_b pri toku I preseže silo kontaktnega stiska F_k , se kontaktni par razpre in prekine tok I (samo pri dovolj majhnem toku in/ali napetosti!), nakar sila F_k ponovno sklene kontakt. Če pa so pogoji v tokokrogu $I > 1$ A, $U_k > 125$ V /5/, kar v je elektroenergetskih tokokrogih zelo pogosto (npr. $U_e = 230$ V, $I_n = 6$ A), potem v trenutku razmaknitve stičnih površin nastane električni oblok z napetostjo $U_a \geq 12$ V pri toku $i(t)$, ki ga določajo pogoji v tokokrogu (Sl. 4). Integral produkta $U_a i$ po t v času trajanja obloka t_a določa količino sproščene toplote, ki na stičnem mestu ustvari bazen staljenega kontaktnega materiala, v katerem se kontaktni par po kratkotrajnem odskoku spet stakne in takoj po ohlaiditvi nastane kontaktni zvar. Velikost kontaktnega zvara je odvisno od sproščene energije v času odskoka kontaktov in s tem tudi sila, ki jo je treba za prekinitev zvara. Na preklopnih kontaktih stikal so tudi v običajnih razmerah mikrozvari na kontaktnem paru dokaj pogost pojav (Sl. 5).

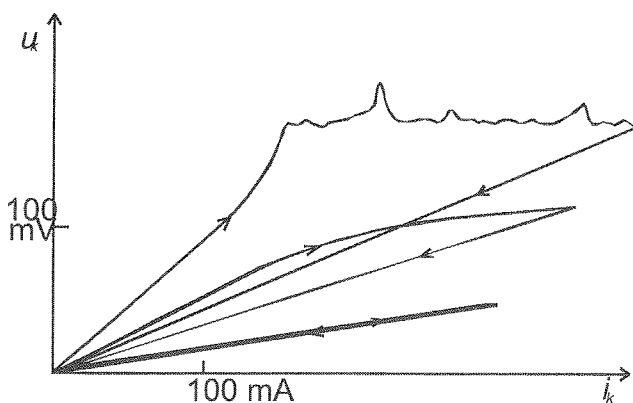


Slika 4: Odskok gibljivega kontaktnega dela v kontaktnem paru (sled »ch3«: $\approx 0,5$ mm/del) zaradi tokovnega sunka i (sled »ch2«: 500 A/del) in napetost na kontaktnem paru U_k (sled »ch4«: 10 V/del). Opazen je takojšnji skok U_k na vrednost minimalne obločne napetosti v trenutku razmaknitve kontaktnih površin.

Zaradi dobrega električnega stika morajo biti kontaktne površine primerno čiste. Vsaka tehnično čista kovinska površina, ki je v okoliški atmosferi, je vedno pokrita vsaj s tanko tujo plastjo adsorbiranih, kondenziranih ali kemijsko vezanih komponent plinov in par, ki povzroča dodatni prehodni upor kontaktnega para /6/. Če je vpliv tuje plasti nezaznaven, ima prehodni upor kontakta značilnosti ohmskega upora. Prehodni upor kontakta pa se lahko z velikostjo prevajanega toka spreminja bodisi zaradi širjenja ele-



Slika 5: Mikrozvar na kontaktnem mestu po vklopu toka, stanje po razmaknitvi kontaktnih površin, SEM – dolžina markerja 100 µm



Slika 6: Nelinearnost $u_k(i)$ kontaktnega para glede na razmere na kontaktnem mestu

ktrično prevodne ploskve a , zaradi tanjšanja vmesne slabo prevodne plasti, zaradi taljenja stičnega mesta ali zaradi električnega preboja tuje plasti. Ti pojavi se odražajo na grafih Sl. 6 in jih pripisujemo učinku »cvrtja« (fritting) kontaktnega mesta /7/. Intenzivnost cvrtja je odvisna od vrste kontaktnega materiala, okoliškega medija in od tuje plasti na kontaktni površini. Glede na namen uporabe kontaktnega para (napetost, tok, okoliški medij, kontaktna sila, ...) se izbere tudi ustrezni kontaktni materiali, za katerega so ti vplivi zanemarljivi /8/.

Zaradi potrebne kontaktne sile in zaradi dinamičnih mehanskih obremenitev pri vklopu (deformacija pri naletu kontaktnih površin) mora biti material kontaktnih oblog (t. j. kontaktni material) na stičnem mestu mehansko dovolj

odporen, da ne pride do nedopustne spremembe oblike ali celo hladnega zvara kontaktov. Zaradi elastične deformacije kontaktov pri vklopu nastane nekaj odskokov gibljivega kontaktnega dela v paru, kar lahko povzroči do kontaktni zvar /9/ zaradi istih pojavov, kot pri elektromagnetni odbojni sili na kontaktnem paru zaradi zožitve toka.

Pri izklopu toka pri pogojih $I > 1 \text{ A}$, $U_k > 125 \text{ V}$ nastane na stičnem mestu med razmikajočimi se površinami kontaktnega para električni oblok. Sproščena toplota, ki se absorbira v kontaktne površine, na njih tali in uparja kontaktni material. Ta delno izpari v okolico, večidel pa se izbrizga po kontaktnih delih, tako se ga z vsakim izklopom nekaj izgubi s kontaktnih oblog /10/. Ko so te na kontaktnem mestu večidel izžgane, nastane kontaktni zvar ali prevelika prehodna upornost kontakta ali pa fizični stik kontaktnega para sploh ni več mogoč. Ti pojavi določajo električno trajnost kontaktov v stikalih za energetiko.

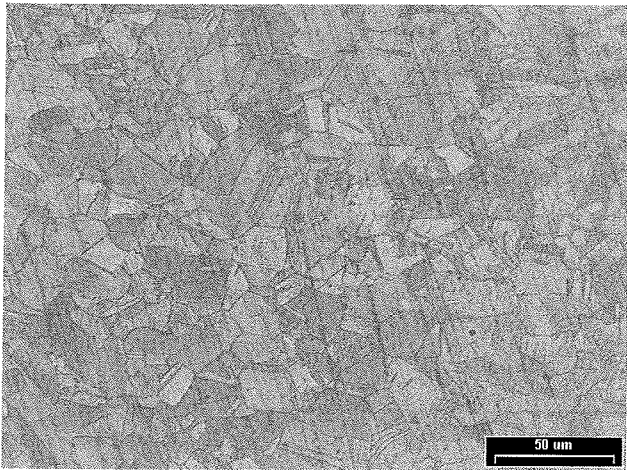
2. Splošne zahteve za kontaktne materiale v energetiki

Za zanesljivo opravljanje stikalne naloge moramo kontaktnemu paru zagotoviti silo kontaktnega stiska, ki ustreza izbranemu kontaktnemu materialu, tega pa izberemo med materiali z dobro električno prevodnostjo, ki omejuje prekomerno segrevanje kontaktnih delov, ter z ustrezno mehansko trdnostjo, ki zagotavlja omejene deformacije kontaktov. Tvorba izolacijskih ali slabo prevodnih tujih plasti na kontaktnih površinah v okoliškem mediju ne sme omejevati dobrega kontakta, zato mora biti material kontaktnih oblog kemijsko dovolj odporen na vplive okolice, da je tuja plast dovolj tanka in/ali mehansko in termično dovolj razgradljiva. Zaradi velikega termičnega učinka obloka na kontaktno površino naj bo material kontaktnih oblog dovolj odporen na obločno izžiganje, ali pa oblok čim hitreje speljemo s kontaktnega mesta, zato naj material omogoča dobro gibljivost obloka po kontaktni površini /11/. Kjer je možnost kontaktnega zvara velika ali pa predstavlja ta nevarno napako delovanja stikalnega aparata, izberemo kontaktni material z visokim tališčem ali pa z mehansko krhkim zvarom.

Veliko teh zahtev si medsebojno bolj ali manj nasprotuje, zato so za posamezne aplikacije potrebni kompromisi. Širšim zahtevam za kontakte v energetiki nizke napetosti v splošnem dokaj dobro ustreza srebro (Ag) in materiali z osnovo srebra /12/, delno tudi baker (Cu) in materiali z osnovo bakra. Kot pomožne materiale z omejeno uporabnostjo in za dodatke k Ag in Cu pogosto najdemo tudi Sn, Cd, Ni, Fe, Mo, W in C (grafit).

3. Baker, srebro in srebrove zlitine

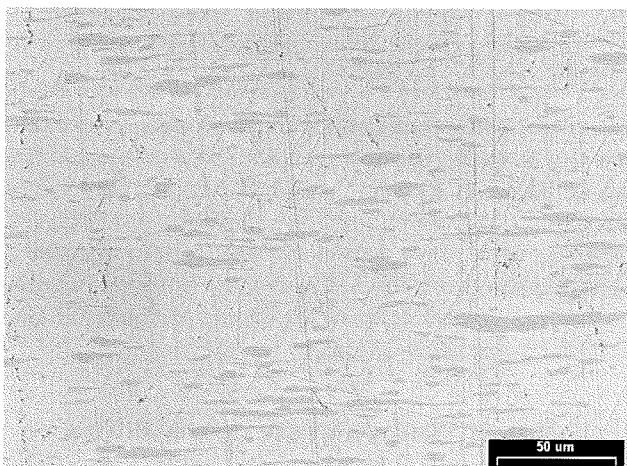
Obe kovini imata zaradi svoje kristalne strukture veliko električno prevodnost in omogočata dobro preoblikovanje v hladnem (Sl. 7). Baker (Cu) je podvržen oksidaciji in v vročem tvori debele plasti CuO /13/, zaradi česar ga upo-



Slika 7: Značilna metalografska struktura nelegiranega Cu, Ag in večine drugih nelegiranih kovin za električne vodnike v energetiki, vidne so meje med posameznimi kristali

rabljamo največ kot nosilni material za kontaktne obloge in električno prevodne dele. Kot kontaktne materiale nastopa v nesimetričnem kontaktnem paru, kadar je drugi partner kemijsko obstojnejši srebrni material z zelo nehomogeno sestavo kontaktne površine, na kateri je gibljivost obloka zelo omejena. Kontaktna površina Cu omogoča obloku dobro gibljivost, tako da je s tem kompenzirana ta slabost prvega partnerja v kontaktnem paru.

Srebro (Ag) ima bakru podobne električne lastnosti, odporno je na oksidacijo, eventualni oksidi so termično razgradljivi pri $\approx 200^\circ\text{C}$ /13/. V atmosferi s spojinami žvepla pa tvori površinski Ag_2S , ki je glede na debelino plasti modre do črne barve. Plast Ag_2S se mehansko delno razgradi že z mehanskim stikanjem kontaktnega para in ima polprevodne lastnosti /13/, zato nima katastrofalnega vpliva na kontaktne lastnosti. Srebro je mehko in zato neodporno na mehanske deformacije pri preklapljanju, zato se upo-



Slika 8: Metalografska struktura kompozita Ag/Ni – prerez v smeri ekstrudiranja. Razpotežnjene temnejše lise so zrna Ni v svetlejšem Ag.

blja za kontakte z majhnimi kontaktnimi silami, t. j. za preklapljanje majhnih tokov reda 1 A.

Zaradi večje mehanske odpornosti je srebro legirano s 3 ... 5 ut. % Cu (materiali AgCu 3 ... AgCu 5), pri čemer se mu nekoliko zmanjša električna prevodnost. Tudi legiranje z Ni do meje topnosti 0,2% /14/ ima podoben učinek, kot s Cu, zato uporabljamo za kontaktne materiale tudi zlitino AgNi 0,15 z 0,15 ut. % Ni.

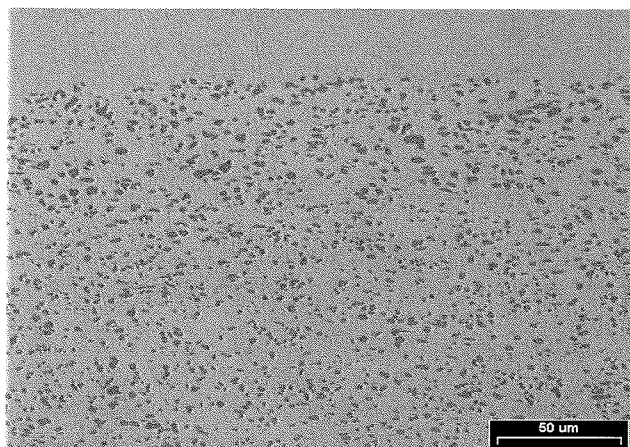
4. Zmesi srebra s kovinskimi granulati

Med kontaktnimi materiali na osnovi srebra najdemo tudi zmesi, kjer so srebru dodana drobno razpršena zrna v Ag slabo topne kovine z višjim tališčem od Ag, v velikosti reda $1\ \mu\text{m}$ /8/. Kot primes se dodaja granulati niklja (Ni) ali železa (Fe). Značilni predstavniki teh materialov z vsebnostjo od 10 ut. % do 30 ut. % Ni je kontaktni material Ag/Ni 10 ... Ag/Ni 30, kjer so ohranjene pretežno vse dobre električne in mehanske lastnosti Ag, tudi zmožnost dobrega preoblikovanja v hladnem. Zato je kot polproizvod vlečen v žico ali profil pravokotnega preseka, kjer se mu metalografska struktura uredi v smeri deformacije (Sl. 8). Material je primeren za kontaktne obloge, ki so izpostavljene intenzivnemu izžiganju z oblokom pri izklopu in kjer naj stikalni aparat v svoji delovni dobi opravi veliko število preklapov. Talina Ag s primešanim trdnim granulatom Ni ima večjo viskoznost od čistega Ag, ker trdni granulati zgostijo talino, zato se ga manj materiala izbrizga v okolico. Stopnja erozije Ag/Ni je zato manjša in električna trajnost kontaktov večja. Ker ima nehomogeni material v notranji zgradbi dodatne mejne površine, je manj odporen na nateg, zato je tudi kontaktni zvar manj trden: material Ag/Ni je zato primeren za pogoje, kjer obstaja nevarnost kontaktnega zvara. Iz zdravstvenih razlogov se namesto Ni uporablja tudi granulati Fe.

Material se da dobro preoblikovati v hladnem, zato lahko izdelamo kontaktne obloge neposredno iz žice, ki jo po koščkih nanašamo na kontaktne dele, uporovno ali ultrazvočno privarimo na podlago in pregnetemo v obliko kovice. Lahko pa je izdelan v obliki predfabriciranih kontaktnih kovnic, ki jih vstavimo v kontaktne dele. Kovice so lahko sestavljene iz dveh ali treh delov (bimetalne, trimetalne) kot kombinacija Cu in Ag/Ni, ki so spojeni z udarnim varjenjem v hladnem.

Zmesni kontaktni material je tudi kompozit volframa (W) in srebra – Ag/W, kjer je osnova kontaktne obloge iz porozonega sintranega W, ki je prepojen z Ag. Vendar je vloga W v Ag bistveno drugačna od vloge Ni ali Fe. V sestavi materiala Ag/W je dominantna komponenta W (50 ut. % do 80 ut. %) /8/, ki je zaradi visokega tališča zelo odporen na izžiganje z izklopnim oblokom, Ag pa zagotavlja dobro električno prevodnost. Zato se kontaktni materiali Ag /W50 ... 80 uporabljajo za dele kontaktnih oblog na mestih, ki so izpostavljeni intenzivnemu obločnemu izžiganju.

Material se zaradi sintrane osnove iz W ne da preoblikovati, pač pa je treba uporabiti predfabricirano končno obliko kontaktne obloge.

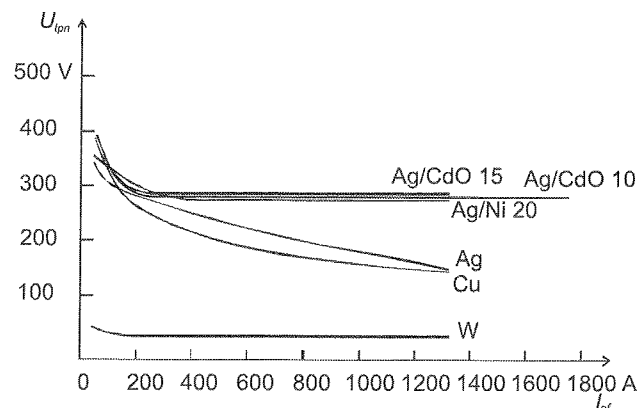


Slika 9: Značilna metalografska struktura Ag/MeO: Ag/CdO 10 – temnejše pegice so zrna CdO v svetlejšem Ag, ob zgornjem robu slike je plast Ag brez oksidnih zrn uporabljena kot varilna plast za spajanje kontaktne obloge na nosilec.

5. Zmesi srebra z granulati kovinskih oksidov (MeO)

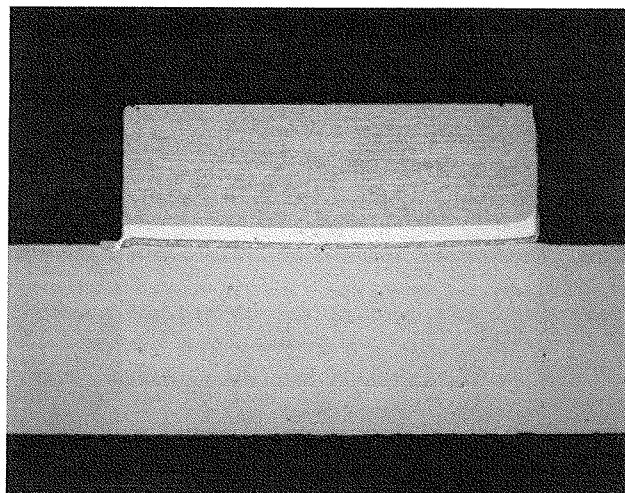
Kovinski oksid je primešan srebru v obliki drobno razpršenega granulata z zrnji reda velikosti $1 \mu\text{m}$ /15/, metalografsko strukturo kaže Sl. 9. Predvsem so to oksidi kadmija CdO, cinka ZnO in kositra SnO_2 z vsebnostjo do 15 ut.% oksida v Ag. Primes oksida ne bistveno poslabša dobre električne lastnosti Ag, bolj pa mehanske. Material z vsebnostjo več kot nekaj ut. % oksida se zaradi povečane krhkosti ne da več zadovoljivo preoblikovati v hladnem. Zaradi izrazito nehomogene mikrostrukture je odporen na varjenje, ker nastane krhek kontaktni zvar, ki ga mehanizem za upravljanje kontaktov stikalnega aparata zlahka raztrga. Kovinski oksid pri stiku z izklopnim oblokom zmanjša obločno napetost, vendar nekoliko podaljša čas gorenja obloka, lahko tudi razpada (CdO pri približno 1300°C disociira na kadmij in kisik /16/). Struktura materiala se v področju delovanja obloka lahko tudi precej spremeni zaradi koagulacije drobno razpršenih oksidnih zrn v večje kose. Vendar je stopnja izžiganja zaradi obloka pri teh materialih zadovoljivo majhna, da se uporabljajo za pogosto preklapljanje tokov reda velikosti nekaj 100 A in za vklop tokov nekaj 1000 A, kjer obstaja velika možnost kontaktnega zvara. Ag/CdO 10 ... 15, Ag/ZnO 6 ... 10 in Ag/ SnO_2 8 ... 12. Zaradi navedenih lastnosti imajo kontaktni materiali z MeO večjo stikalno zmogljivost, kot kontakti iz Ag/Ni.

Ti materiali se odlikujejo tudi po veliki in od toka skoraj neodvisni *takojšnji napetosti povratnega vžiga*. Po ugasnitvi izklopnega obloka se med razprtim kontaktnim parom takoj (to pomeni v časovnem merilu $1 \mu\text{s}$) vzpostavi napetost 200 ... 300 V tudi pri izklopih tokov reda do nekaj 100 A /17/ (Sl.10), V tokokrogih z obratovalno napetostjo do 230 V kontakti s tem kontaktnim materialom zanesljivo, brez povratnega vžiga obloka, pri veliki pogostosti preklapljanja izklaplajo toke reda nekaj 100 A.



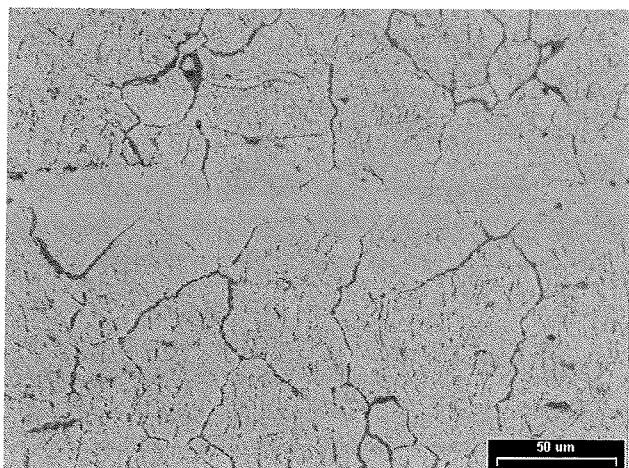
Slika 10: *Takojšnja napetost povratnega vžiga U_{tpn} kot funkcija toka izklopa za nekatere največ uporabljene kontaktne materiale. Prednost kompozitov Ag/Me in Ag/MeO pred Ag in Cu je izrazita pri večjih tokovih.*

Zaradi omenjenih mehanskih lastnosti se te materiale z več kot kak ut. % kovinskega oksida oblikuje z ekstruzijo, zato pri izdelavi kontaktnih delov lahko uporabljamo le predfabricirane kontaktne obloge v obliki kovic za vstavljanje ali profiliran trak ustrezne oblike, iz katerega režemo ploščice in jih elektrouporovno ali ultrazvočno navarimo na kontaktni del. Odpornost proti kontaktnemu zvaru pomeni tudi slabo varljivost na nosilno podlago, zato je kontaktna obloga na strani spajanja na podlago obložena s tanko plastjo za varjenje, npr. Ag ali trde spajke za spajkanje, kot kaže prečni presek kontaktne obloge na Sl. 11.



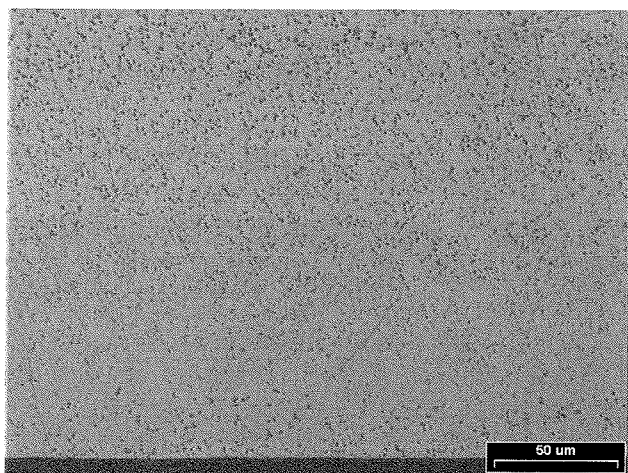
Slika 11: *Zgradba ploščice za kontaktno oblogo (pravokotnik na zgornji polovici slike) iz Ag/MeO, odporne na kontaktni zvar, ki je privarjena na nosilec. Med Ag/MeO materialom (večje sivo polje) in Cu nosilcem je vidna plast Ag (svetel pas) in plast trde spajke Agphor 15 (tenak siv pas)*

Vnos kovinskega oksida (MeO) v Ag je mogoč s procesom notranje oksidacije zlitine AgMe, kjer zlitino pri visoki tem-



Slika 12: Delna notranja oksidacija Me-komponente v AgMe zlitini po mejah kristalnih zrn

peraturi izpostavimo kisikovi atmosferi. Zaradi difuzije kisika s površine kovinskega kosa v notranjost se Me globinsko oksidira in izloča v obliki oksidnih zrn. Proces je najhitrejši po kristalnih mejah (Sl. 12), z dovršeno tehnologijo pa je MeO razporejen enakomerno po vsem volumnu (Sl. 13).

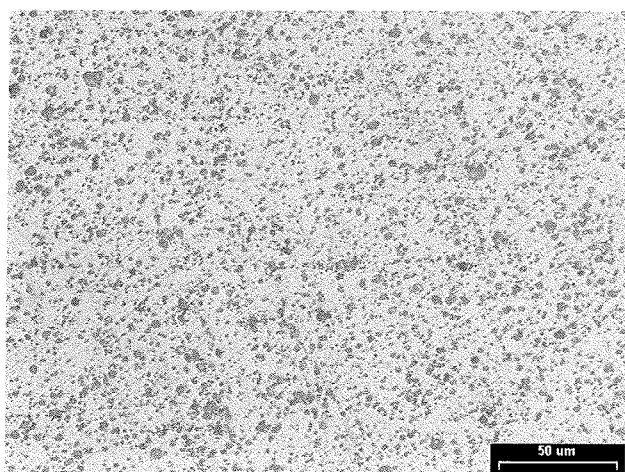


Slika 13: Notranja oksidacija Cd v zlitini AgCd, zrna CdO so razporejena enakomerno po kristalni strukturi materiala. Kontaktna površina je ob spodnjem robu slike

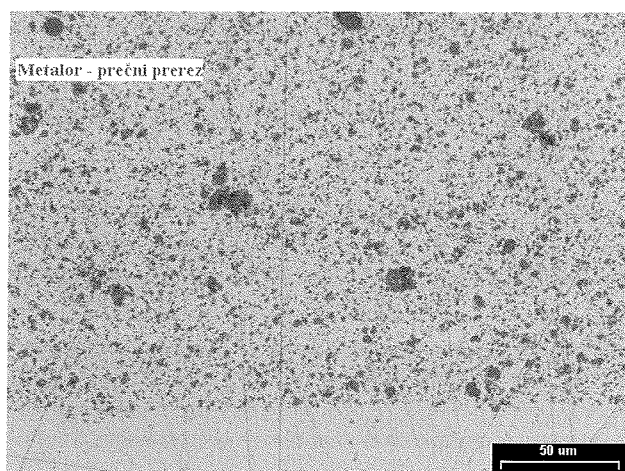
Tehnologija notranje oksidacije se uporablja pri Ag/CdO in Ag/SnO₂, Ag/ZnO in nekatere različice materiala Ag/CdO pa se izdelujejo z metalurgijo prahov iz zmesi granulata Ag in MeO s sintranjem in ekstruzijo v profilirane trakove (Sl. 14) in kovice. Zaradi direktive ROHS se Cd opušča, zato bo opuščen tudi Ag/CdO.

6. Zmesi srebra z grafitnim granulatom

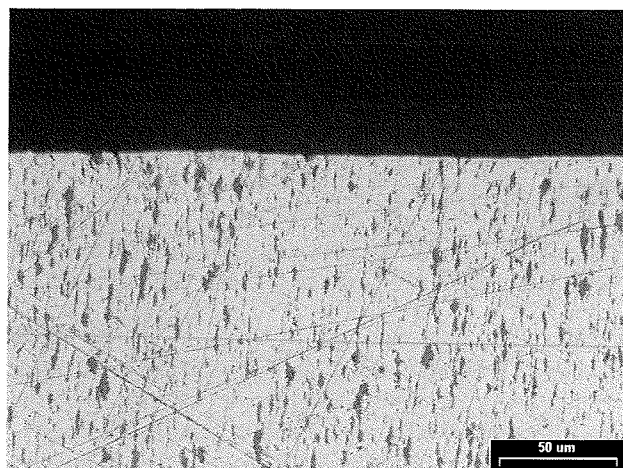
Kontaktne materiali z grafitnim prahom od 3 ut. % do 5 ut. % v Ag (Ag/C 3 ... 5) imajo veliko odpornost na kontaktne



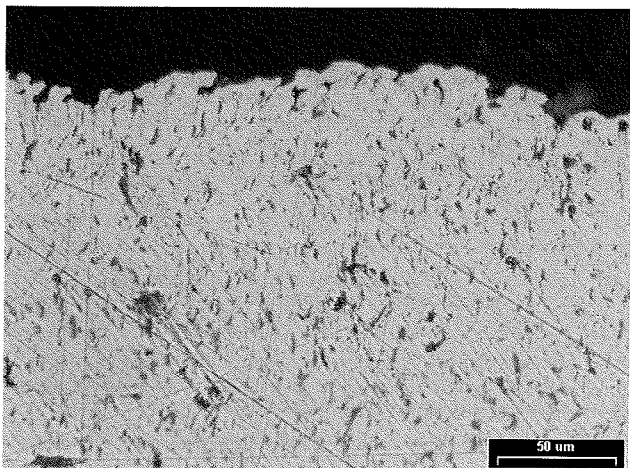
Slika 14a: Material Ag/MeO, izdelan z metalurgijo prahov – metalografska struktura Ag/SnO₂ 12



Slika 14b: Material Ag/MeO, izdelan z metalurgijo prahov – metalografska struktura Ag/ZnO 12, ob spodnjem robu plast Ag kot varilna plast za spajanje na nosilec.

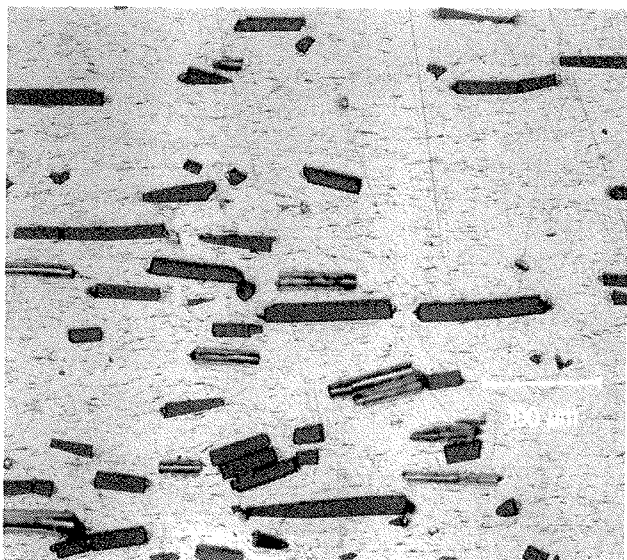


Slika 15: Struktura Ag/C s pravokotno na kontaktno površino usmerjenimi grafitnimi vlakni (temne lise), prikazan je predel pod kontaktno površino

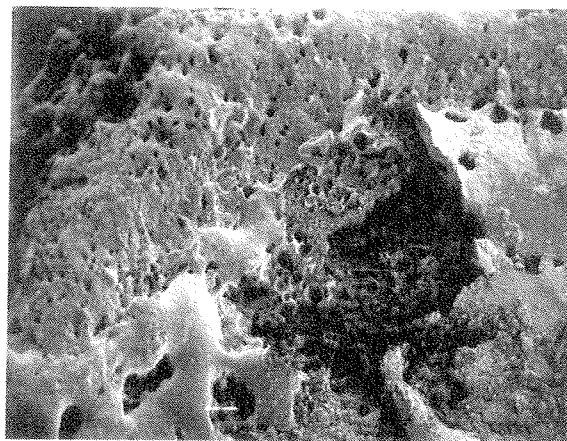


Slika 16: Tvorba gobaste plasti na staljeni kontaktni površini Ag/C zaradi termičnega učinka podnožja izklopnega obloka.

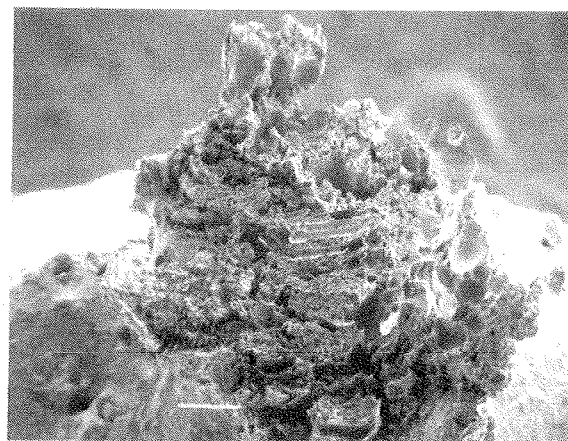
zvar. To jim omogoča posebna struktura porazdelitve C: grafitna vlakna so postavljena pravokotno na stično ploskev (Sl. 15). V površinski plasti na stičnem mestu pri nastanku obloka nastane talina Ag, v kateri grafit zgori v CO in CO₂, katerih mehurji oblikujejo gobasto površinsko strukturo (Sl. 16). Zvar s tako strukturo je zelo krhek, zato je Ag/C odporen na kontaktni zvar /18/. Zaradi velike stopnje obločne erozije material ni primeren za kontakte z veliko pogostostjo preklapljanja. Na električno zelo nehomogeni površinski strukturi Ag/C je tudi gibljivost obloka majhna, ker se njegovo podnožje zasidra na grafitna vlakna. Da izboljšamo to slabost kontaktne obloge Ag/C, ima za nasprotnega partnerja v paru kontakt iz Cu. V tej vlogi stična površina Cu ni zelo izpostavljena oksidaciji v vročem, ker stično mesto na Cu obdajata CO in CO₂ kot zaščitni plin, izkoriščena pa je velika gibljivost obloka na Cu, ki kompenzira slabo gibljivost na Ag/C.



Slika 17: Struktura Ag/C DF z grafitnimi vlakni in grafitnimi paličicami, usmerjenost grafitnih delcev je vzporedna s kontaktno površino.



Slika 18: Kontaktni zvar na Ag/C DF po pretrganju – na iztrganem delu so vidni odtisi grafitnih paličic, SEM – dolžina markerja 100 µm



Kontaktne obloge Ag/C so v obliki ploščic, ki jih dobijo iz ekstrudirane palice z C-vlakni v smeri vlečenja palice. Palico narežejo v prizme, ki jim na površine izžgejo grafit, prizme pa razrežejo na pol. Ploskev razreza postane stična ploskev s pravokotno postavljenimi grafitnimi vlakni. Ta postopek je dokaj zamuden v primerjavi s tehnologijo izdelave miniprofila z ekstruzijo, vendar pa so zato v strukturi miniprofila grafitna vlakna postavljena vzporedno s kontaktno površino, kar je glede stopnje erozije in možnosti kontaktnega zvara slabša izbira. Za izboljšanje odpornosti na kontaktni zvar so grafitnim vlaknom dodane drobne, do 100 µm dolge palčke grafita /8/ (Sl. 17), ki naredijo strukturo Ag/C dovolj mehansko nehomogeno, da se kontaktni zvar pretrga na palčkah (Sl. 18).

7. Sklep

Vsaka vrsta kontaktnega materiala ima v podanih pogojih nekaj za izbrane pogoje uporabe ustreznih in nekaj neugodnih lastnosti. Univerzalni kontaktni material, ki bi ustrezal vsem pogojem preklapljanja toka, ne obstaja. Izbira kontaktnega materiala za vnaprej določene pogoje upo-

rabe je stvar kompromisa med ugodnostjo njegovih ustrezni lastnosti in sprejemljivostjo neugodnih. Primer kompromisa je nesimetrični kontaktni par Ag/C – Cu za odklop-nike, v katerem z enim samim materialom ne odpravimo motečih pomanjkljivosti, ampak slabosti enega materiala kompenziramo z prednostmi drugega v nesimetriji kontakta.

8. Literatura

- /1/ R. Holm: *Electric contacts: theory and applications*, 4th ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2000
- /2/ M. Lindmayer: *Schaltgeräte*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1987
- /3/ H. Fehling: *Über die Kontaktbeanspruchung an Schnellschaltern bei hohen Spitzströmen*, AEG-Mitt. 48, 1958, pp. 191-196
- /4/ P. G. Slade: *Electrical Contacts. Principles and Applications*, Marcel Dekker New York Inc., 1999
- /5/ E. Vinaricky: *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendung*, 2. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
- /6/ K. Millian, W. Rieder: *Kontaktwiderstand und Kontaktoberfläche*, Z. Angew. Phys. 8, 1956, pp.28-34, Electrical Contacts, Zurich, Switzerland, 2002, pp. 268-275
- /7/ C. Huber, A. Murr: *Fritting behaviour of telephone switching contacts material as a result of exposure to industrial atmosphere*, Proc. 10. Int. Conf. On Electr. Contact Phenom, Budapest, 1980, pp.979-988
- /8/ Kontaktwerkstoffe auf Silber-Basis, AMI DODUCO – tehnični podatki
- /9/ E. Walczuk: *Über das Schweissverhalten einschaltender Kontakte während des Prellens*, E. u. M. 87 (1970), pp.111-119
- /10/ D. Amft: *Der Elektrodenabbrand durch Schaltlichtbogen in Luft und in verschiedenen Gasen*, Proc. SIELA, Plovdiv 1971, pp. 68-81
- /11/ H. Burkhard: *Schaltgeräte der Elektroenergie-technik*, Verlag Technik, Berlin 1985
- /12/ A. Keil, W. A. Merl, E. Vinaricky: *Elektrische Kontakte und ihre Werkstoffe*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1984
- /13/ H.-J. Dräger: *Destruction of sulphide layers on high current contacts*, Proc. 7th ICEC, Paris, 1974, pp.410-414
- /14/ M. Hansen, K. Anderko: *Constitution of binary alloys*, McGraw-Hill, New York, 1958
- /15/ F. Hauner, D. Jeannot, K. McNeilly, *Advanced AgSnO₂ contact materials with high total oxide content*, Proc. 21. Int. Conf. On Electric Contacts, Zurich 2002, pp.452-456
- /16/ V. Behrens, *Kontaktwerkstoffe für Niederspannungs-Schaltkontakte – eine Einführung*, 20. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2009, pp.155-159
- /17/ M. Schmelze: *Grenzen der Selbstlöschung kurzer Lichtbogenstrecken bei Wechselstrombelastung*, Diss. TH Braunschweig, 1969
- /18/ E. Vinaricky: *Das Abbrand und Schweissverhalten verschiedener Silber-Graphit-Kontaktwerkstoffe in unterschiedlichen Atmosphären*, Diss. Technische Universität Wien, 1994

dr. Martin Bizjak, univ. dipl.ing fizike

R&R, Iskra MIS, d. d,
Ljubljanska cesta 24a, 4000 Kranj,
e-mail: martin.bizjak@iskra-mis.si

Prispelo (Arrived): 12.10.2009 Sprejeto (Accepted): 09.06.2010