

LASTNOSTI ELEKTRIČNIH KONTAKTOV NA OSNOVI SREBRA V RAZMERAH TEHNOLOŠKEGA ONESNAŽENJA IN INDUSTRIJSKE ATMOSFERE

CHARACTERISTICS OF Ag-BASED ELECTRIC CONTACTS UNDER THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL CONTAMINATION AND INDUSTRIAL ENVIRONMENT

Martin Bizjak

Iskra Stikala, d.d., Savska loka 4, 4000 Kranj

Prejem rokopisa - received: 1998-11-10; sprejem za objavo - accepted for publications: 1999-02-09

Srebrni kontaktni materiali, kakršne uporabljamo v stikalnih aparatih za upravljanje električnih naprav in javljanje, so podvrženi škodljivim vplivom okolja, v katerem delujejo, včasih pa se na kontaktih zaznajo tudi vplivi neprimernih tehnoloških postopkov izdelave. Ti se kažejo v mikrostrukturi stičnih površin na kontaktnem mestu. Kadar so na stični površini plasti nečistoč kakršnega koli porekla, podatek o kontaktni upornosti ni merodajen za oceno lastnosti kontakta, ker je pri staknjenih kontaktih odvisnost med kontaktno napetostjo U_c in tokom skozi kontakt I v splošnem nelinearna in lahko doseže izrazit napetostni nivo. Ta pojav smo izkoristili pri raziskavi vpliva nečistoč na kontaktih pri izdelavi njihovih delov, zaradi čistilnih postopkov in pod vplivom okoliške atmosfere.

Ključne besede: kontaktni materiali na osnovi srebra, tanke plasti nečistoč, kontaktna napetost, nelinearnost kontaktnih lastnosti, napetostni nivo

Silver-based contacts, commonly used for switching in control of electrical devices and signaling, suffer from the functional degradation due to environmental conditions. Sometimes the influence of unsuitable manufacturing technology can be indicated. They results in the microstructure and conditions of contact spot. Particularly when the surface films are presented on contacts, the results of contact resistance does not indicate the complete state of contact characteristics, while the relation of contact voltage fall versus current through contact spot at closed contacts is in general nonlinear or even tends to achieve some distinct level. This effect was applied in order to research possible contamination influence of manufacturing technologies, various cleaning methods, and the influence of polluted industrial environments.

Key words: silver-based contact materials, thin contaminating films, contact voltage fall, nonlinearity of contact characteristics, voltage leveling

1 UVOD

Stikala za upravljanje električnih naprav in javljanje njihovega stanja preklaplajo toke velikostnega reda 1 A pri napetosti vira, ki je večja od 10 V. Na stičnih mestih so kontaktne obloge v obliki kovic ali ploščic iz kontaktnega materiala na osnovi srebra. Lastnosti srebra (Ag) kot izvrstnega električnega prevodnika z veliko korozijsko odpornostjo, posebno primerne za kontakte stikal, so poznane že iz začetkov elektrotehnike. V časih nizke stopnje onesnaženosti ozračja z žveplovim dioksidom, dušikovimi oksidi in halogeni je bila slaba stran srebra za kontakte njegova velika mehanska deformabilnost, kar so izboljšali z dodatkom nekaj odstotkov bakra. Namesto čistega Ag se tako za kontakte uporablja zlitine AgCu 3÷15%. Z naraščanjem industrializacije in s tem povezanim onesnaženjem ozračja je nastal problem sulfidiranja srebrnih kontaktov. Zaznali so ga najprej v relejih za telefonijo, kjer so zaradi majhnih tokov kontakti občutljivi za površinske nečistoče. Dodatek 10÷50% Pd v zlitini AgPd 10÷50 poveča odpornost proti sulfidiranju, sorazmerno vsebnosti Pd.

Za kontakte stikal v upravljalških in javljalnih tokokrogih uporabljamo zaradi funkcionalnih in stroškovnih razlogov v glavnem dodatke niklja, kovinskih oksidov in grafita v zlitini AgNi 0.15, zmeseh Ag/Ni 10÷40, Ag/CdO 10÷15, Ag/SnO₂ 10÷12 in Ag/C 3÷15. Ti dodatki niso namenjeni za povečanje odpornosti proti atmosferskim vplivom, zato se na površini tovrstnih materialov v industrijski atmosferi rade pojavljajo plasti slabo prevodnega Ag₂S, pa tudi AgCl in Ag-nitritov. Le v posebnih razmerah se tvori tudi Ag-oksidi. Tudi če so te plasti debele samo 10 nm, zaznavno poslabšajo kontaktne lastnosti.

Na kontaktne lastnosti slabo vplivajo tudi tanke in težko zaznavne plasti tehnoloških nečistoč, maziv, prstni odtisi in podobno. Tanke plasti te vrste lahko ostanejo na površini kontaktov tudi po neustrezno opravljenih postopkih čiščenja kontaktnih delov pred vgradnjo. Poznani so tudi škodljivi vplivi organskih nečistoč v obliki par¹, ki jih oddajajo deli stikala iz polimernih materialov².

Vpliv industrijske atmosfere na kontaktne lastnosti materialov za kontakte stikal za upravljanje in javljanje ter učinkovitost nekaterih pogostejše uporabljanih čistilnih postopkov sta bila raziskana na vzorčnih

kontaktnih parih iz materialov AgNi 0.15, Ag/Ni 10 in Ag/CdO 10.

2 PRIPRAVA VZORČNIH KONTAKTOV

Kontaktni pari so bili izdelani iz traku širine 2,6 mm in debeline 0,3 mm. Kontaktna stran je bila po širini zaobljena s polmerom 9 mm. Iz traku so bili narezani okrog 5 cm dolgi vzorci, ki so bili površinsko predobdelani:

- čiščenje v ultrazvočni kopeli freona (kloro-fluorogljik). Čistilo smo izbrali zaradi njegove učinkovitosti, vendar pa smo želeli preveriti, ali se zaradi vsebnosti Cl v njem lahko tvori na srebrni površini tanka plast AgCl in ali po čiščenju ostanejo na kontaktih kake druge tanke plasti.
- vakuumsko izplinjanje površin pri povišani temperaturi: metoda se precej uporablja v vakuumski tehniki. Način čiščenja je izbran zaradi hipotetične možnosti nastanka kompaktnih plasti težje hlapnih komponent.
- površinska obdelava v vodikovi plazmi: metoda zaradi okoljevarstvene neoporečnosti zamenjuje druge metode čiščenja in ne pušča ostankov čistilnega sredstva.
- izpostava vlažni atmosferi z dodatkom H_2S : tvori se površinsko plast Ag_2S . Površina vzorca je bila pred izpostavo plinu H_2S očiščena v ultrazvočni kopeli freona in v vodikovi plazmi, da bi dobili na kontaktni površini le tanko plast Ag-sulfida.

Površinsko obdelani vzorci so bili v vmesnem času do meritev zaščiteni proti prahu, čeprav je bilo med meritvijo nemogoče docela odpraviti vpliv prahu.

3 MERSKA METODA ZA OVREDNOTENJE KONTAKTNIH LASTNOSTI

Za določitev kontaktnih lastnosti vzorcev po različnih površinskih obdelavah je bila izbrana metoda merjenja kontaktne napetosti U_c na staknjenem kontaktnem paru, ki je posledica prehoda toka I skozi kontaktno mesto. Zveza med U_c in neodvisno spremenljivko I je bila dobljena iz serije meritev U_c pri toku I , ki se je med meritvijo spreminjal po času t v enakih korakih v intervalu od 0 do 3,0 A. Izbrani način merjenja je splošnejša metoda meritve kontaktne upornosti R_c .

Kontaktne lastnosti so odvisne tudi od sile kontaktnega stiska F_c , zato smo jo uvedli kot parameter, ki je bil med meritvijo U_c konstanten. Najmanjša sila F_c , ki je še dopuščala meritve, je bila 3 cN. Pri manjših silah pa zaradi vibracij različnega izvora iz okolice kljub ukrepom za zmanjšanje njihovega vpliva meritve niso bile smiselne. Naslednja velikost sile F_c 15 cN je bila izbrana glede na rezultate predhodnih meritev in je v

kritičnem območju vrednosti; od tod navzgor je zagotovljen zanesljiv in stabilen električni stik.

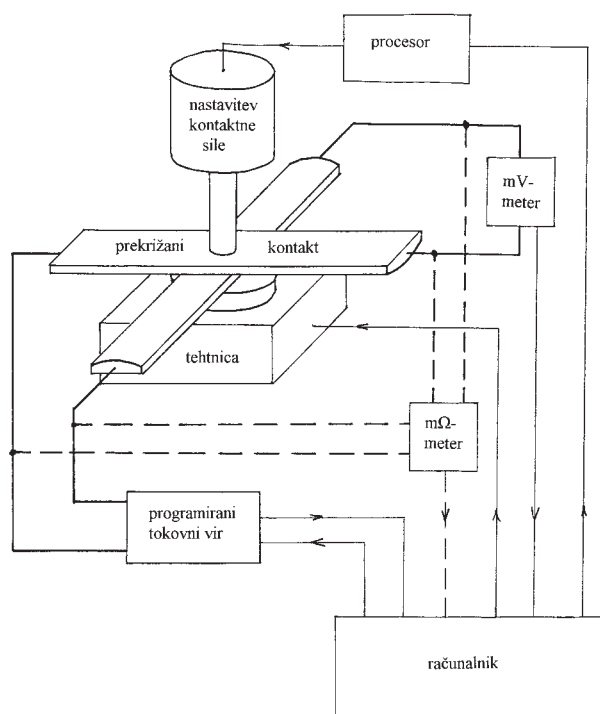
Vsak kontaktni par je bil merjen na stiku prekrižanih kontaktnih trakov (metoda "crossed rods"), kjer sta bila po dva sosednja kraka tokovna priključka, med drugima dvema pa smo merili U_c . Na kontaktnih parih so bile opravljene meritve karakteristike $U_c(I)$ na 5 stičnih mestih vzdolž kontakta z medsebojnim razmikom 1 mm.

4 MERILNI SISTEM

Uporabljeni merilni sistem s komponentami za upravljanje, nastavljanje merskih parametrov in merilnimi inštrumenti je shematsko prikazan na **sliki 1**.

Na vpenjalo z nosilci prekrižanih kontaktov je spodnji nosilec toga zvezan z elektronsko tehniko, zgornjega pa premika servomotor, ki ga upravlja računalnik po podatkih tehnice, tako da programirano nastavlja, vzdržuje ali spreminja potek sile F_c . Sistem servomotorjev omogoča tudi nastavitev stičnega mesta na drugo lokacijo s posebno pozornostjo na mehak stik obeh kontaktnih parov pri ponovni sklenitvi kontakta.

Sistem za meritev električnih količin sestavlja računalniško programiran tokovni vir za tok I in milivoltmeter za merjenje U_c . Računalnik upravlja spreminjanje toka I v tokovnem viru v 10-sekundnih korakih in na koncu vsakega, ko je dosežena termična stabilizacija stičnega mesta, odčita U_c . Pari izmerjenih vrednosti, ki se shranjujejo v računalniški spomin,



Slika 1: Shematični prikaz merilnega sistema s komponentami za upravljanje poteka meritve in z merilnimi inštrumenti

Figure 1: The schematic presentation of measuring equipment consisting of control and measuring components

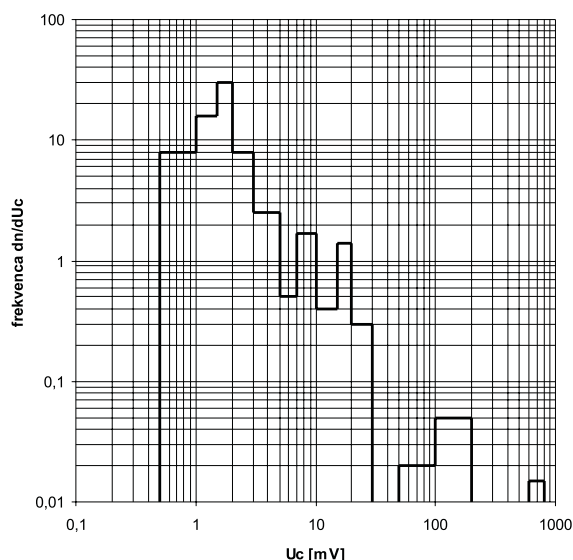
podajajo funkcijo kontaktne karakteristike $U_c(I)$ v območju od začetne vrednosti pri $I = 0$ A do zgornje meje $I = 3,0$ A pri izbrani vrednosti F_c kot parametru.

5 REZULTATI MERITEV $U_c(I)$

Kontaktne karakteristike kot funkcija toka I so bile sistematsko izmerjene na kontaktnih parih iz AgNi 0.15, Ag/Ni 10 in Ag/CdO 10, ki so bili različno površinsko obdelani: s freonom, plazmo in sulfidiranjem. Rezultati po vakuumskem izplinjaju so bili slabši od pričakovanj in tudi z uporabniškega stališča relativno nezanimivi zaradi zahtevne tehnologije priprave površine vzorčnih kontaktov. Zato sistematskih meritev vakuumsko razplinjenih vzorcev nismo nadaljevali.

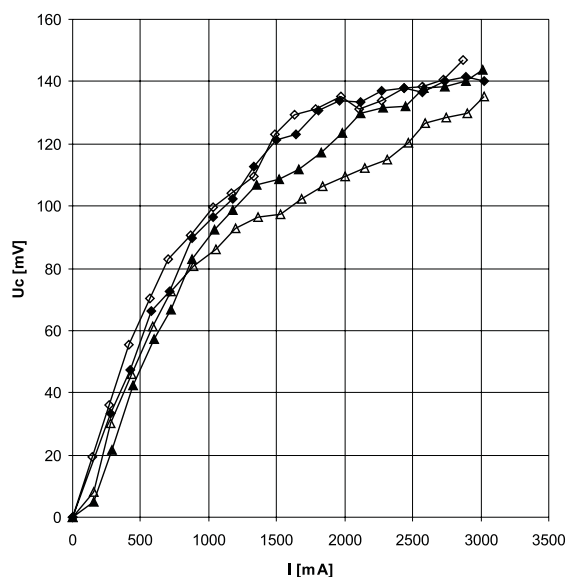
Izmerjene kontaktne karakteristike kot funkcije $U_c(I)$, dobljene v 5 različnih točkah kontaktne površine na opisanih različicah vzorcev kontaktov, se lahko precej razlikujejo med seboj na različnih stičnih mestih istega vzorca, čeprav so si nekatere z različnih vzorcev bolj podobne. Izmerjene funkcije izkazujejo obseg tipov od skoraj popolne linearnosti, preko naraščajoče stopnje konveksnosti, do strmega dviga v konstanten napetostni nivo.

Najpogostejši tip funkcij, izmerjenih pri vzorčnih kontaktih, je bila linearna funkcija, ki izraža konstantne razmere na kontaktnem mestu, zaznavna konveksnost funkcije pa nakazuje njegovo kompleksnejšo strukturo. Funkcije, ki dosežejo pri zgornji meji merilnega toka majhne vrednosti, to je pri $U_c(3,0 \text{ A}) < 20$ mV, so praviloma linearne tipa z določljivo kontaktno upornostjo R_c kot parametrom z vrednostjo $R_c < 5 \text{ m}\Omega$.



Slika 2: Histogram porazdelitve vrednosti U_c pri zgornji meji merilnega toka 3,0 A za izmerjene kontaktne karakteristike brez izrazitega napetostnega nivoja

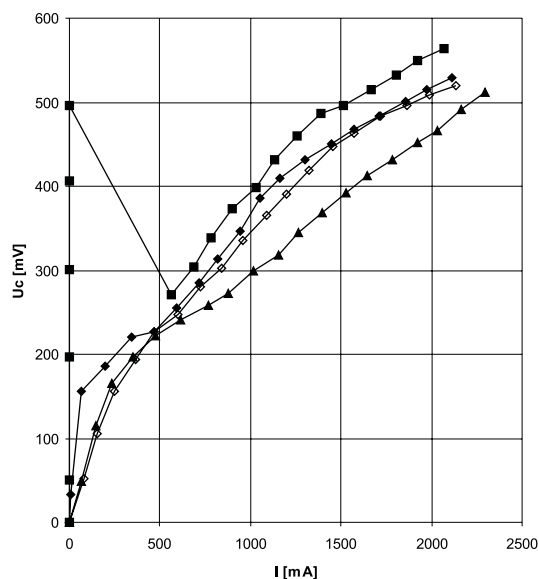
Figure 2: The distribution of U_c values at upper limit of measuring current range 3.0 A for obtained contact characteristics having no distinct voltage leveling



Slika 3: Nelinearna funkcija za kontaktne karakteristike prve manjše podskupine v histogramu porazdelitve (slika 2)

Figure 3: Nonlinear function of contact characteristics belonging to the first minor subgroup of statistical distribution, shown in **Figure 2**

Pri funkcijah z $U_c(3,0 \text{ A}) \rightarrow 100$ mV ($R_c \rightarrow 30 \text{ m}\Omega$) je zaznati že precejšnjo konveksnost in stopnja nelinearnosti narašča z večanjem $U_c(3,0 \text{ A})$. Pogostost porazdelitve vseh izmerjenih funkcij po razredih vrednosti $U_c(3,0 \text{ A})$ je prikazan s histogramom porazdelitvene gostote na **sliki 2**. Na histogramu je mogoče razločiti, da so rezultati grupirani v eno veliko in dve manjši skupini: glavna skupina z največ zastopniki



Slika 4: Nelinearna funkcija za kontaktne karakteristike druge manjše podskupine v histogramu porazdelitve (slika 2)

Figure 4: Nonlinear function for contact characteristics of second minor subgroup of statistical distribution, shown in **Figure 2**

pripada razredom vrednosti $U_c(3,0 \text{ A}) < 30 \text{ mV}$, prva manjša skupina v razredu $U_c(3,0 \text{ A})$ med 100 in 200 mV in druga manjša med 600 in 800 mV. Medtem ko je za glavno skupino porazdelitve značilna pretežna linearnost karakteristik, lahko tudi v karakteristikah obeh manjših porazdelitvenih skupin razpoznamo skupne značilnosti: za skupino s porazdelitvijo pretežno v $100 \text{ mV} < U_c(3,0 \text{ A}) < 200 \text{ mV}$ so njene kontaktne karakteristike $U_c(I)$ prikazane na **sliki 3**, za skupino v intervalu $600 \text{ mV} < U_c(3,0 \text{ A}) < 800 \text{ mV}$ pa na **sliki 4**. Včasih se pojavi začetni dvig $U_c(0)$, kadar postane zaradi izolacijskih vključkov na kontaktnem mestu stik električno prevoden šele pri neki dovolj veliki napetosti, npr. pri 500 mV v primeru na **sliki 4**. Na tem kontaktnem mestu je ocenjena debelina izolacijske plasti 5 nm^3 .

Kontaktne karakteristike $U_c(I)$ z izrazitim napetostnim nivojem dosežejo nivojno vrednost pri toku I nekaj 100 mA. Značilni primer napetostnega nivoja je prikazan na **slikah 5 in 6**, kjer so zbrane karakteristike z več različnih kontaktnih mest. Pri nekaterih kaže strm začetni dvig $U_c(I)$ na znane pojave, ki vzpostavljajo električno prevodnost kontaktnega mesta s prevleko plasti nečistoč⁴. Pri nadaljnjem večanju toka skozi kontakt poteka pri pretežno konstantni napetosti U_c pojav termične razgradnje plasti na kontaktni površini ("fritting")^{4,5}. Iz meritev so bile ocenjene naslednje vrednosti napetostnih nivojev: $30 \pm 5 \text{ mV}$, $70 \pm 10 \text{ mV}$ in $200 \pm 10 \text{ mV}$.

Zveza med tipom izmerjenih kontaktnih karakteristik in pripadnost specificiranim različicam kontaktnih vzorcev je prikazana v **tabeli 1**, kjer so za vsak tip kontaktnega materiala, vrsto obdelave kontaktne

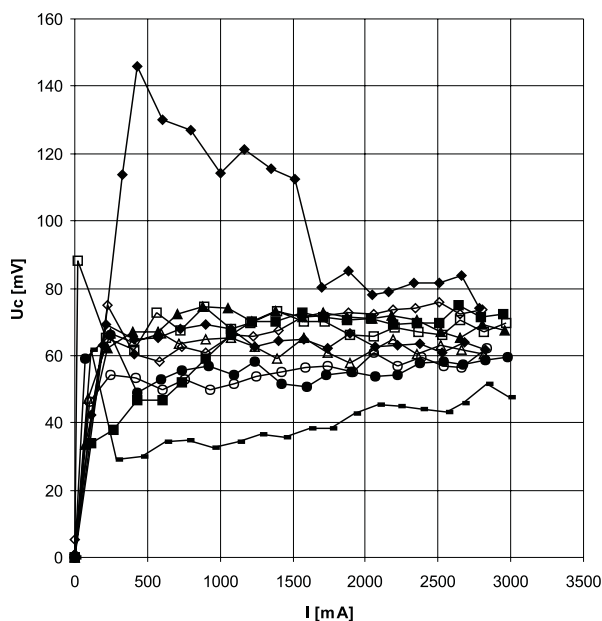
površine in kontaktno silo F_c (3 cN, 15 cN) podane vrednosti U_c pri 3,0 A; oznaka L poleg vrednosti pomeni karakteristiko z napetostnim nivojem (kot na **sliki 5 ali 6**).

Pri **tabeli 1** velja opozoriti na karakteristike z napetostnim nivojem 200 mV in na tiste z naraščajočo funkcijo, pri katerih U_c pri 3,0 A preseže 130 mV (**slika 2**); manjša skupina s porazdelitvijo v razredih $100 \text{ mV} < U_c < 200 \text{ mV}$, je bila dobljena izključno na vzorčnih kontaktih, izpostavljenih pred meritvijo atmosferi H_2S .

Karakteristike z napetostnim nivojem 70 mV so bile dobljene le na kontaktnem materialu Ag/CdO po obdelavi v ultrazvočni kopeli freona in po postopku v plazmi, in to le pri majhnih kontaktnih stiskih $F_c = 3 \text{ cN}$. Napetostni nivo 30 mV se pojavlja, podobno kot pri 70 mV, za karakteristike s katerokoli od obeh nivojnih vrednosti pa ni mogoče trditi, da izražata bodisi lastnosti kontaktnega materiala določene vrste, bodisi značilnosti načina priprave kontaktne površine preiskovanih vzorcev.

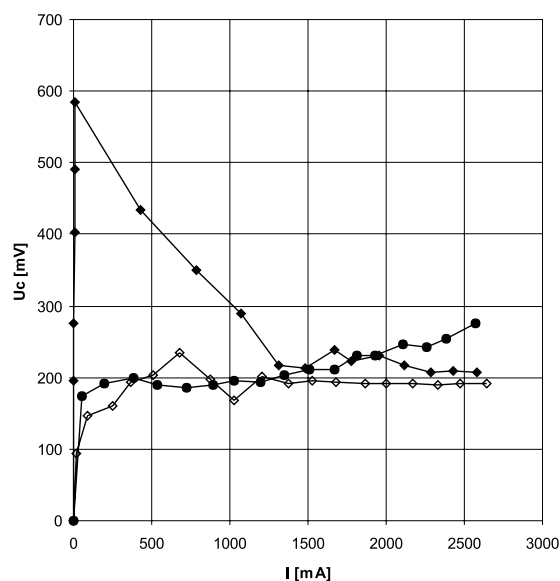
6 DISKUSIJA

Rezultati meritev na vzorčnih kontaktih so odsev stanja stičnega mesta in jih lahko v neki meri uporabimo za indikacijo strukture kontaktne površine, kateri ti rezultati pripadajo. Pri dovolj velikih tokih dosežemo nivojno vrednost, ki je posledica strukturnih sprememb na stičnem mestu zaradi termičnih vzrokov, tudi na stiku dveh čistih kovinskih površin. Tako je za Ag z majhno vsebnostjo legirnih dodatkov ali za zmesne materiale na osnovi Ag napetostni nivo 0,39 V, kar ustreza temperaturi tališča Ag, ter 0,7 V pri temperaturi vrelišča⁶



Slika 5: Primeri kontaktnih karakteristik z napetostnim nivojem med 50 mV in 70 mV

Figure 5: Examples of contact characteristics with voltage leveling at values between 50 mV and 70 mV



Slika 6: Kontaktne karakteristike z napetostnim nivojem 200 mV, ki verjetno izraža značilnosti stika preko tanke plasti Ag_2S

Figure 6: Contact characteristics with level voltage of 200 mV, reflecting presumably conduction of current through the interface of Ag_2S thin film

Tabela 1: Kontaktna napetost U_c pri največjem merilnem toku 3,0 A**Table 1:** Contact voltage fall U_c obtained at maximal measuring current of 3.0 A

pov.obdel.	RF plazma		freon + UZ		H ₂ S	
F_c [cN]	3	15	3	15	3	15
kont.mat.	U_c [mV]					
AgNi 0.15	L 35,8	1,5	564	519	20	22,8
	L 34,2	1,2	529	L 74,1	7,1	18,3
	1,6	0,8	L 33,4	21,4	7	18,3
	1,4	0,7	4,6	6,5	3,8	16,1
	1,1	0,6	1,9	3,4	2,7	15,7
Ag/Ni 10	L 30	17,9	8,9	116,4	L 276	135
	L 30	2,4	2,5	1,6	147	143,6
	L 24,4	1,8	1,8	1,5	87	140,2
	L 22	1,3	1,8	1		
	14,3	1,3	1,6	0,8		
Ag/CdO10	511,5	3,9	L 73,5	13,4	15,8	L 206,8
	L 72,5	2,4	L 67,3	3,2	15,6	L 191,1
	L 69,5	1,9	L 62,1	2,8	7,4	1,9
	L 59,3	1	L 61,9	2,1	7	1,7
	L 47,5	1	L 60,3	2	1,6	1,5

tekočega kontaktnega mostička, ki se pri velikih tokih lahko pojavi na stičnem mestu. Nelinearnost funkcije kontaktne karakteristike $U_c(I)$ je lahko posledica popuščanja trdote^{3,4} zaradi rekristalizacije Ag in Ag-zmesi pri približno 200°C⁶. Iz osnovnih fizikalnih zakonitosti izhaja enolična zveza med največjo temperaturo kontaktnega mesta T_k in napetostjo nivoja U_c , ki z empiričnimi popravki podaja to relacijo za Ag v naslednji uporabi obliki:

$$T_k = 3100\sqrt{U_c^2 + 0,009} \quad (1)$$

kjer je T_k [K] določena pri izbranem U_c [V] z natančnostjo 10%, če je temperatura v intervalu 100°C < T_k < 500°C.

Rekristalizacija Ag (pri 200°C) pomeni prehod v nelinearnost pri nivojni vrednosti nad 120 mV. Nelinearne karakteristike z dvigom U_c med 130 mV in 150 mV (**slika 3**), ki so bile dobljene na sulfidiranih kontaktih, verjetno izražajo zmeščenost Ag na kovinskem stičnem delu površine kontaktnega mesta, ki je zaradi plasti Ag₂S že v začetku močno zožano. Rekristalizacijski prehod ne kaže izrazitega napetostnega nivoja, pojav pa morda spremljajo še učinki zaradi ostankov plasti nečistoč.

Nelinearne karakteristike z dvigom U_c preko 500 mV verjetno izražajo pojave na stiku preko pregretega tekočega kovinskega mostiča iz Ag taline, ki je nastal zaradi zelo omejenega področja prevajanja toka kot posledica neugodne mikrotopografije kontaktnega mesta ali pri oteženem stiku zaradi tujih delcev. Pri nadaljnjem naraščanju toka bi U_c verjetno dosegla vrelišče Ag pri 0,7 V.

7 SKLEPI

Iz nivojnih vrednosti karakteristik so po enačbi (1) ocenjene temperature termične spremembe strukture kontaktnega mesta za merjene kontaktne vzorce. Računski rezultati so podani v **tabeli 2**.

Tabela 2: Ocena temperature stičnega mesta T_k iz U_c po izračunu iz (1)**Table 2:** Estimated temperature of contact spot T_k calculated from U_c by using Eq.(1)

U_c [mV]	T_k [°C]
190 < > 210	350 < > 400
60 < > 80	65 < > 85
34 < > 45	30 < > 40

Za sulfidirane kontakte je nivojna vrednost U_c prikazana na **sliki 6**, in je 200 ± 10 mV. Ocenjena vrednost za temperaturo se dokaj dobro sklada s temperaturo tališča Ag₂S⁵, zato lahko nivojno napetost karakteristik $U_c(I)$ za sulfidirane vzorce pripišemo tališču plasti Ag-sulfida. Druge nivojne vrednosti, ki so navedene v **tabeli 2**, dajo po izračunu temperature pod 100°C, kar je zunaj področja z natančnostjo ocene 10%. Te so izmerjene na očiščenih kontaktnih vzorcih in pretežno pri majhnih silah F_c . Zato lahko sklepamo, da je na kontaktnem mestu prevleka tanke in mehansko precej deformabilne plasti. Ker se $U_c(I)$ karakteristike različnih kontaktnih mest na istem vzorcu po značilnostih razlikujejo v širokem obsegu od linearne do nivojske, je plast nečistoč verjetno lokalizirana na več ozkih območjih na kontaktni površini. Odgovor na vprašanje, kako je bilo mogoče na očiščenih kontaktih zaznati prisotnost nečistoč, je verjetno treba iskati pri učinkovitosti čistilnih postopkov ali pri manipuliranju z vzorci pred

meritvijo, ker imajo plasti nečistoč značilnosti snovi, kot so razna mazalna sredstva, želatinaste snovi ali sledi prstnih odtisov. Manj verjetno smemo te karakteristike pripisati lastnosti kontaktnega materiala ali načinu priprave preiskovanega vzorca kontaktnega para, saj ni opazne korelacije. Očitno te kontaktne karakteristike pripadajo stični površini z zelo tankim nanosom, ki ni v zvezi z značilnostmi vzorca.

8 LITERATURA

- ¹ W. Rieder, *IEEE CHMT*, 15 (1992) 166
- ² L. Koller, M. Mozetič, K. Požun, M. Bizjak, S. Vrhovec, *Kovine, zlitine, tehnologije*, 32 (1998) 3-4, 255
- ³ M. Antler, *IEEE Circuit and Device Magazine*, 3 (1987) 2, 8-19
- ⁴ R. Holm, *Electrical Contact*, Springer, Berlin, 1967
- ⁵ A. Keil, *Verkstoffe für elektrische Kontakte*, Springer, Berlin, 1960
- ⁶ *DODUCO Datenbuch*, 2. Aufl., Pforzheim, 1977