

Debeloslojni grejni elementi

Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović

Institut za telekomunikacije i elektroniku IRITEL a.d. Beograd

Beograd, Republika Srbija

inam@iritel.com; zdravkos@iritel.com

Sažetak — Debeloslojna tehnologija se godinama koristi za realizaciju elektronskih sklopova koji sadrže provodne, otporne i dielektrične slojeve. Struktura debeloslojnih otpornika se pokazala kao pogodna za primene u formiranju grejnih elemenata na ravnim podlogama od različitih materijala. U radu je predstavljena realizacija dva tipa ovih debeloslojnih struktura koje su formirane procesom sito štampe nanošenjem komercijalno raspoloživih debeloslojnih pasti na bazi staklenih i metalnih prahova na ravne keramičke i čelične podloge. Prikazan je tehnološki proces realizacije kao i parametri realizovanih grejnih elemenata. Pokazano je da elementi ovog tipa mogu naći široku primenu u uređajima opšte i specijalne namene zbog svojih brojnih kvaliteta: kompaktni su, ravni su elementi niskog profila, obezbeđuju uniformnu raspodelu toplote i veće brzine zagrevanja, imaju poboljšanu kontrolabilnost i pouzdanost, širi opseg otpornosti i TCR-a, fleksibilnog su dizajna i omogućavaju brzu izradu prototipova.

Gljučne riječi - Grejni elementi; debeloslojna tehnologija; zagrevanje; sito štampa; alumina; nerđajući čelik; niskoomski debeloslojni otpornici; dielektrični slojevi.

I. UVOD

Nepoželjno zagrevanje debeloslojnih otpornika u toku eksploatacije debeloslojnih sklopova u okolnostima kada se zahteva pouzdan rad na sobnim temperaturama dovodi do degradacije električnih karakteristika otpornika koja može dovesti do katastrofalnog otkaza celog sklopa. Međutim, ovaj fenomen je našao primenu u realizaciji debeloslojnih grejnih elemenata različitih formi i dimenzija sa širokim spektrom primena [1-3]. Ova vrsta grejnih elemenata može se naći u:

- uređajima za procesiranje hrane,
- digitalnim kopir aparatima i štampačima,
- aparatima za zagrevanje gasova i tečnosti,
- gasnim senzorima/detektorima,
- opremi za realizaciju poluprovodničkih komponenti,
- medicinskoj opremi,
- biološkoj opremi,
- uređajima za pakovanje,
- dispenserima,
- uređajima koji zahtevaju pouzdane grejne elemente malih dimenzija,
- uređajima koji zahtevaju otporne linije specifičnog rasporeda i toplotne raspodele, itd.

Debeloslojna tehnologija omogućava direktnu depoziciju debeloslojnih kompozitnih materijala direktno na podlogu procesom sito štampe. Na ovaj način se mogu formirati debeloslojni grejni elementi različitih dimenzija i proizvoljnih

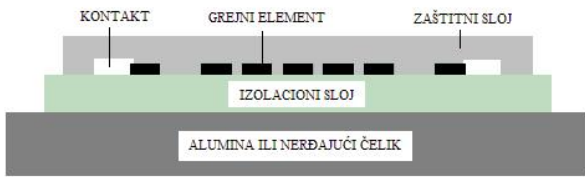
geometrija podloga i grejača pri čemu se na istoj podlozi pored grejnog elementa mogu integrisati i kontrolna i senzorska kola. Kao podloge za grejne elemente ovog tipa najčešće se koriste keramički supstrati i to alumina (96% Al_2O_3) i aluminijum-nitrid (AlN) kao i podloge od nerđajućeg čelika. Prilikom projektovanja debeloslojnih grejnih elemenata, pored adekvatnih upotrebljenih materijala, geometrija grejača određuje uniformnost raspodele temperature na površini elementa bez stvaranja vrućih tačaka kao potencijalnih mesta katastrofalnih otkaza.

Grejni elementi ovog tipa imaju brojne prednosti i iz tog razloga je u radu predstavljena realizacija dva tipa debeloslojnih grejnih elemenata. Grejni elementi kružnog i serpentinskog tipa realizovani su na alumina podlogama i podlogama od nerđajućeg čelika. Pored tehnologije realizacije, parametara procesa štampanja i žarenja i upotrebljenih materijala prikazani su i parametri realizovanih elemenata koji su kompaktni i niskoprofilni, projektovani na način koji omogućava fleksibilan dizajn i obezbeđuje uniformnu raspodelu toplote.

II. DEBELOSLOJNI GREJNI ELEMENTI

Debeloslojni grejni elementi se najčešće formiraju na alumina keramičkim podlogama (96% Al_2O_3) ili podlogama od nerđajućeg čelika. Podloga mora biti čista i suva, te se podloge od nerđajućeg čelika moraju odmastiti ne bi li se minimizovala mogućnost pojave korozije tokom procesiranja. Tokom celog procesa formiranja debeloslojnih grejnih elemenata potrebno je obezbediti rad u kontrolisanoj sredini da bi se izbegla kontaminacija pa samim tim i otkaz formiranih debelih slojeva. Na pripremljenu podlogu procesom sito štampe se nanosi izolacioni sloj. Da bi se ostvarila željena debljina žarenog sloja štampaju se četiri sloja pri čemu se svaki pojedinačni sloj suši i žari. Na taj se način ostvaruje ukupna debljina izolacionog sloja $\geq 100 \mu\text{m}$. Grejač debeloslojnog grejnog elementa se formira korišćenjem niskoomskih debeloslojnih pasti slojnih otpornosti 100 ili 200 $\text{m}\Omega/\square$ sa vrednostima TCR iz opsega 1000 - 2800 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$. Pravilnim izborom otpornog kompozitnog materijala i forme grejača koji se najčešće formira u vidu dugačke tanke linije niskoomskog otpornog materijala, za otpornik slojne otpornosti 100 $\text{m}\Omega/\square$ očekivana gustina snage je približno 1 W/mm^2 duž cele površine grejnog elementa. Kontakti se formiraju provodnim kompozitnim materijalom na bazi Ag pri čemu se u eksploataciji grejnog elementa kontakt sa grejačem ne sme ostvariti lemljenjem zato što može doći do otkaza lemnog spoja zbog temperaturnog cikliranja. Nakon sušenja i žarenja otpornih i provodnih slojeva nanosi se zaštitni sloj debljine

žarenog sloja $\approx 25 \mu\text{m}$. Struktura ovako realizovanog debeloslojnog elementa prikazana je na slici 1.

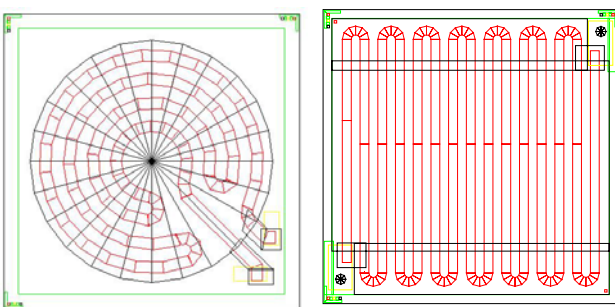


Slika 1. Struktura debeloslojnog grejnog elementa realizovanog na keramičkoj ili čeličnoj podlozi

Važno je napomenuti da podloge različitog sastava i površinske obrade mogu dovesti do varijacija u performansama grejnih elemenata. Kada je reč o podlogama od nerđajućeg čelika, grublje obrađena površina čelične podloge može narušiti integritet slojeva i dovesti do otkaza električne izolacije. Tako se onemogućava direktan kontakt površine grejnog elementa i grejane površine te ne može doći do optimalnog transfera toplote u željenim pozicijama. S druge strane, niski profili i kompaktan dizajn grejnih elemenata na kermičkim podlogama uz mogućnost da se ostvari bilo koji geometrijski oblik grejača i podloge koji aplikacija može zahtevati ili gde grejači na čeličnim podlogama ne mogu biti upotrebljeni donosi smanjenje površine grejača i troškova realizacije. Debeloslojni grejni elementi uključuju i mogućnost inkorporiranja dodatnih funkcija na istoj podlozi kao što su debeloslojni senzori temperature ili kontrolna i upravljačka kola.

III. REALIZACIJA DEBELOSLOJNIH GREJNIH ELEMENATA

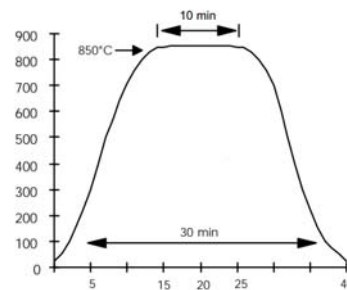
U Institutu za elektroniku i telekomunikacije IRITEL a.d. Beograd projektovana su i realizovana dva tipa debeloslojnih grejnih elemenata. Grejači su projektovani u vidu tankih linija niskoomskog otpornog materijala koje formiraju kružne ili srepentinske forme na podlogama dimenzija $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Grejač kružne forme karakterišu otporne linije širine $3,8 \text{ mm}$ i ukupne dužine $594,4 \text{ mm}$, dok serpentinški grejač karakterišu otporne linije širine 3 mm i ukupne dužine 1307 mm . CAD projekat debeloslojnih grejnih elemenata prikazan je na slici 2.



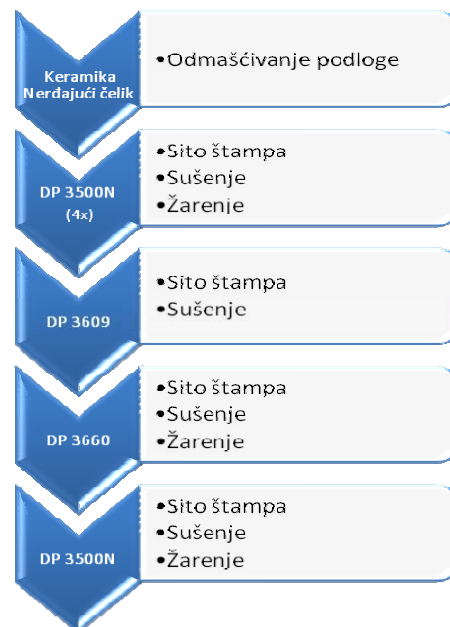
Slika 2. CAD projekat debeloslojnih grejnih elemenata

Debeloslojni grejni elementi su realizovani standardnim tehnikama sito štampe na keramičkim podlogama (alumina - $96\% \text{ Al}_2\text{O}_3$) i podlogama od nerđajućeg čelika (S430). Za njihovu realizaciju su upotrebljene komercijalno raspoložive

DuPont debeloslojne paste. Za realizaciju izolacionog sloja upotrebljena je gusta dielektrična pasta DuPont 3500N na bazi stakla sa visokom temperaturom omekšavanja, obogaćenog neorganskom komponentom koja redukuje mogućnost izvijanja podloge. Da bi se obezbedile optimalne performanse izolacionog sloja štampana su 4 sloja pri čemu je ostvarena ukupna debljina žarenog izolacionog sloja od $100 \mu\text{m}$. Grejači su realizovani niskoomskom otpornom pastom DuPont 3609 slojne otpornosti $200 \text{ m}\Omega/\square$, dok su kontakti formirani provodnom pastom na bazi Ag sa oznakom DuPont 7760. Zaštitni sloj je realizovan DuPont 3500N pastom koja je upotrebljena i za realizaciju izolacionog sloja. Za razliku od izolacionog sloja štampan je samo jedan sloj pri čemu je ostvarena debljina žarenog zaštitnog sloja od $25 \mu\text{m}$. Po štampanju, svaki od vlažnih slojeva je 15 min nivelisan na sobnoj temperaturi, a zatim sušen u konvejskoj infracrvenoj sušnici u ciklusu od 15 min na temperaturi od $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Svi formirani slojevi su žareni u ciklusima od po 30 min sa maksimalnim temperaturama žarenja od $850 \text{ }^\circ\text{C}$ u trajanju od 10 min (sl. 3). Dijagram toka realizacije jednog debeloslojnog grejnog elementa prikazan je na slici 4.

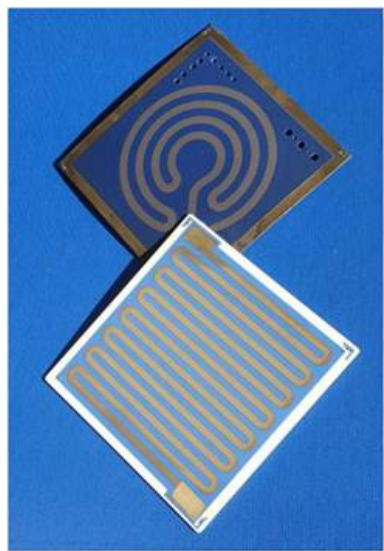


Slika 3. Ciklus žarenja debeloslojnih grejnih elemenata ($t = 30 \text{ min}$, $T_{\text{max}} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$ u trajanju od 10 min)



Slika 4. Dijagram toka realizacije debeloslojnog grejnog elementa

Fotografije dva debeloslojna grejna elementa, uzorkovana slučajnim odabirom iz više serija realizovanih elemenata, prikazane su na slici 5, a njihove karakteristike su date u tabeli I. Grejni element kružnog tipa, snage 1,8 kW, realizovan je na podlozi od nerđajućeg čelika. Serpentinski grejni element, snage 0,553 kW, realizovan je na alumina keramičkoj podlozi. Svi realizovani elementi, snaga do 3kW, su testirani i ispitana je njihova pouzdanost.



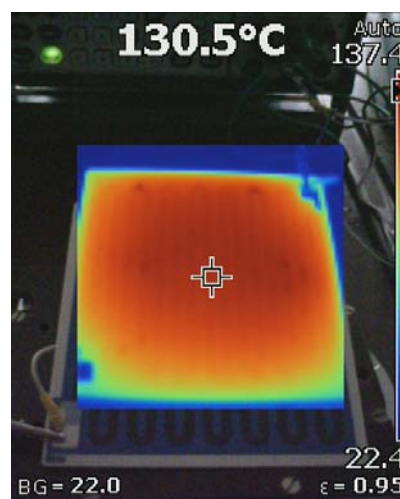
Slika 5. Kružni i serpentinski debeloslojni grejni elementi realizovani na keramičkoj i čeličnoj podlozi.

TABELA I. KARAKTERISTIKE REALIZOVANIH DEBELOSLOJNIH GREJNIH ELEMENATA (R - otpornost, P - snaga, l - dužina otporne linije, w - širina otporne linije, R_{st} - slojna otpornost, TCR - temperaturni koeficijent otpornosti)

<i>Podloga</i>	<i>Materijal</i>				<i>Dimenzije (mm²)</i>	
Podloga 1	Alumina keramika (96% Al ₂ O ₃)				100x100	
Podloga 2	Nerđajući čelik (S430)				100x100	
<i>Grejač</i>	R (Ω)	P (kW)	l (mm)	w (mm)	R_{st} (m Ω /□)	TCR (ppm/°C)
R_1 (kružni)	31,44	1,8	594,4	3,8	200	1000
R_2 (serpentinski)	87,6	0,553	1307	3	200	1000

Pokazalo se da direktan kontakt koji grejana površina ostvaruje sa debeloslojnim grejnim elementom obezbeđuje precizan transfer toplote do željene pozicije. Debeloslojni kompozitni materijali na bazi stakla obezbedili su neporoznu površinu grejnog elementa koja sprečava apsorpciju vlage. Testirani grejni elementi su prilikom zagrevanja ispoljili brz temperaturni odziv i uniformnu toplotnu raspodelu na celoj površini grejnog elementa. Kao ilustracija uniformnosti raspodele toplote, na slici 6 je prikazana fotografija serpentinskog debeloslojnog grejnog elementa realizovanog na Al₂O₃ keramičkoj podlozi zagrejanog na 130,5°C snimljena termokamerom Fluke Ti95. Alumina, kao podloga grejnog

elementa je obezbedila odličnu termičku provodnost, nizak koeficijent termičkog širenja i veoma brza vremena zagrevanja i hlađenja. Ova svojstva uz nisku dielektričnu konstantu, visokotemperaturnu i dimenzionu stabilnost čine aluminu idealnom podlogom za realizaciju debeloslojnih grejnih elemenata. Čelična podloga je pokazala slične performanse uz ograničenje da kod grejnih elementa većih površina može doći do izvijanja podloge. Ovo se može izbeći upotrebom podloga od nerđajućeg čelika većih debljina pa se za grejne elemente kružnog tipa prečnika većih od 100 mm preporučuju čelične podloge debljina većih od 1,2 mm.



Slika 6. Grejač serpentinskog tipa realizovan na Al₂O₃ keramičkoj podlozi zagrejan na 130,5°C snimljen termokamerom Fluke Ti95

IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana realizacija kružnih i serpentinskih debeloslojnih grejnih elemenata na podlogama od alumina keramike (96% Al₂O₃) i nerđajućeg čelika (S430). Opisani su upotrebljeni debeloslojni kompozitni materijali, tehnike i parametri procesa realizacije. Pokazano je da su realizovani grejni elementi pogodni za primene u kojima je potreban brz odziv grejnog elementa uz uniformnu raspodelu toplote. Oni obezbeđuju kombinaciju transfera toplote, termičke efikasnosti, brzog temperaturnog odziva, uniformnosti raspodele toplote uz niskoprofilnu formu elementa. Mogu se primeniti i u slučajevima ograničenog prostora ili kada konvencionalni grejači ne mogu biti upotrebljeni. Debeloslojni grejni elementi su niskoprofilni i omogućavaju fleksibilnost u pogledu dimenzija i forme grejača. Direktan kontakt grejane površine sa grejnim elementom formiranim na termički stabilnoj podlozi obezbeđuje optimalan transfer toplote. Osnovne karakteristike realizovanih grejača su:

- Podloge: alumina (96% Al₂O₃), nerđajući čelik (430)
- Dimenzije podloge: do 100×100 mm²
- Preporučena temperatura podloge: ≤ 400 °C
- Slojna otpornost: 100m Ω /□, 200m Ω /□
- TCR: 1000 - 2800 ppm/°C
- Snaga: ≤ 3 kW
- Napon: 220V

Karakteristike debeloslojnih grejnih elemenata omogućavaju da elementi ovog tipa mogu biti laserski isečeni tako da formiraju proizvoljan CAD generisani dvodimenzioni oblik čime se povećava spektar njihove primene u uređajima koji pored kontrolabilnosti i pouzdanosti zahtevaju i specifičan dizajn grejača. Dalji razvoj debeloslojnih elemenata mogao bi da obuhvati realizaciju debeloslojnih grejnih elemenata na različitim cilindričnim podlogama čime bi se proširio spektar njihove primene. Kvarc ili keramičke podloge dobijene postupkom injekcionog brizganja mogle bi biti upotrebljene kao podloge za cilindrične grejne elemente koji bi bili pogodni za primene u hemijski agresivnim sredinama. Ravno kvarcno staklo u kombinaciji sa tehnologijom debelog filma bi se moglo koristiti u slučajevima kada je neophodna rezistentnost na koroziju i poboljšana vidljivost. Debeloslojna tehnologija, koja omogućava i brzu izradu prototipova, pruža mogućnost kombinovanja različitih materijala i podloga za postizanje optimuma i u pogledu uniformnog transfera toplote i u pogledu fleksibilnosti dizajna potrebnog da zadovolji potrebe širokog spektra savremenih uređaja.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan zahvaljujući podršci Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru angažovanja na projektima III44003 i III45007.

LITERATURA

- [1] R.B. Tait, R. Humphries and J. Lorenz, "Thick film heater elements and temperature sensors in modern domestic appliances", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30(3), pp. 573 – 577, June 1994.

- [2] J. Milewski, M. Borecki, J. Kalenik and K. Król, "Thick Film Heater for Sensor Application", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 494(1), 2014.
- [3] A. Sale, M. A. Stein, R. Tait and J. Whitmarsh, "Thick film heaters and heat sensors", Hybrid Circuit Technology, Vol. 8(5), pp. 37-43, 2018.

ABSTRACT

For years thick-film technology has been used in production of various electronic devices that comprise conductive, resistive and dielectric layers. Structure of thick resistive films has proved to be suitable for realization of heating elements on different types of flat substrates. This paper describes formation of two types of these thick-film structures formed using screen printing process. Technological production process is presented along with measured properties of realized heating elements formed using commercially available thick-film compositions based on glass and metal powders that have been deposited on flat ceramic and stainless steel substrates. It is shown that these two types of heating elements can find widespread use in general and special purpose appliances because of their numerous beneficial properties. These compact low profile elements provide uniform heat distribution, higher heat transfer rates, improved controllability and reliability, wider resistance and TCR ranges, design flexibility and rapid prototyping.

THICK-FILM HEATING ELEMENTS

Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović