

**UTICAJ TOPLOTNOG OTPORA ZAVARENOG SPOJA NA  
PRENOS TOPLOTE KROZ ZIDNI PREGRIJAČ PARE**

**THE EFFECT OF THERMAL CONTACT RESISTANCE OF WELD  
JOINT ON HEAT TRANSFER THROUGH WALL STEAM  
SUPERHEATER**

**Namir Neimarlija, Dr. Sci.,  
Elektroprivreda BiH dd Sarajevo**

**Ejub Džaferović, Dr. Sci.,  
Mašinski Fakultet u Sarajevu**

**REZIME**

*U ovom radu je izvršena numerička analiza uticaja toplotnog kontaktnog otpora u dijelu zavarenog spoja cijevi i rebra na proces kondukcije toplote kroz zidni pregrijač pare. Proračuni temperaturnih polja su izvršeni korištenjem numeričkog metoda konačnih zapremena. Simulacija kontaktnog toplotnog otpora je izvedena na jednostavan način, zadavanjem odgovarajućih vrijednosti toplotnih fluksova na granicama kontakta cijevi i rebra. Teorijski, raspon vrijednosti zadanih fluksova može biti od nula pa do neke vrijednosti koja odgovara slučaju bez kontaktnog toplotnog otpora. Opisani način simulacije kontaktnog toplotnog otpora ne zahtijeva neminovno poznavanje mikro strukture, odnosno hrapavosti površina u kontaktu, što pristup čini vrlo podesnim kod preliminarnih analiza temperaturnih polja i procjene mogućih negativnih efekata. Prezentirani rezultati proračuna stacionarnih temperaturnih polja pokazuju da ne postoje značajni diskontinuiteti temperature na granici dodira rebra i cijevi.*

**Ključne riječi:** Zidni pregrijač pare, Var, Toplotni kontaktni otpor, Numerički metod, Temperaturno polje.

**ABSTRACT**

*In this paper numerical analysis is carried out in order to investigate the influence of thermal contact resistance within part of the weld joint pipe and fin on the heat conduction process through wall steam superheater. The calculations of temperature fields are performed using the finite volume method. The simulation of thermal contact resistance is conducted simply, by giving appropriate heat fluxes on the contact boundaries of the fin and pipe. Theoretically, the thermal flux values can be in the range from zero to some value which corresponded to the case without thermal contact resistance. For described way of simulation thermal contact resistance, it is not necessary to be familiar with informations about micro structure of the surfaces in contact, i.e. their asperity, what this approach do very suitable for preliminary temperature fields analyses and assessment potential consequences. The presented results of calculation of stationary temperature fields show that there are no large temperature discontinuities at contact boundaries of the fin and pipe.*

**Keywords:** Steam wall superheater, Weld, Thermal contact resistance, Numerical method, Temperature field

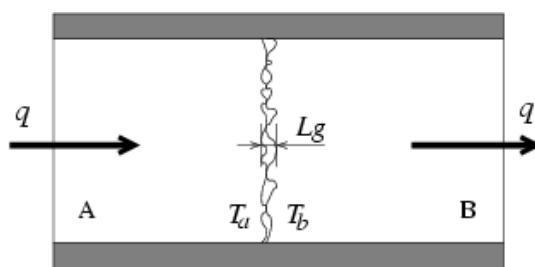
## 1. UVOD

Fenomen termičkog kontaktnog otpora je povezan sa procesima transporta toplotne energije i često je rezultat kompromisnih tehničkih rješenja ali ponekad i greški u izradi dijelova uređaja. Jedan od ne tako rijetkih defekata koji se pojavljuje kod procesa zavarivanja je tzv. nedovoljno zavareni spoj posebno u slučajevima zavarivanja bliskih elemenata relativno velike debljine. Parni kotlovi u membranskoj izvedbi imaju zidove od cijevi međusobno spojenih rebrima, dakle konstrukcije koja se u procesu fabrikacije temelji na znatnom udjelu procesa zavarivanja. Iako se proizvodnja membranskih zidova obavlja automatizirano, greške su moguće i stoga se čini interesantnim proanalizirati jedan takav slučaj. Slika 1 (lijevo) prikazuje fotografiju dijela presjeka membranskog zida. Kružnica bijele boje označava mjesto zavarenog spoja cijevi i rebra koji nisu u potpunom kontaktu, tj. ne postoji potpuno zavareni spoj, dok je na slici 1 desno, bojama istaknuta pozicija površina u kontaktu. Ove situacije se mogu javiti prilikom zavarivanja (čeono) cijevi i rebra u membranskom zidu tokom zamijene većih ili manjih dijelova površine membranskog zida ili pojedinačne cijevi.



Slika 1. Nepotpuno zavaren spoj rebra i cijevi (Lijevo) i bojama istaknuta linija kontakta (Desno)

Zidovi pregrijača imaju ulogu i prijemnika toplote. Rebro koje povezuje dvije susjedne cijevi mora da prenese kondukcijom primljenu toplotnu energiju dalje kroz materijal prema cijevi kroz koju struji radni medij, vodena para. Ukoliko postoji kontaktni toplotni otpor na mjestu zavarenog spoja, kao posljedica greške zavarivanja ili načina zavarivanja, može doći do pregrijavanja rebra i generisanja termičkih napona koji, opet, mogu dovesti do deformacija i lomova membranskog zida. Ova vrsta greške kod zavarenih spojeva se može posmatrati kao diskontinuitet u materijalu. S tim u vezi postoji i diskontinuitet toplotnog fluksa u ovim zonama.



Slika 2. Šematski prikaz dva tijela u kontaktu

Fizikalni mehanizam kontaktnog otpora se može bolje razumjeti posmatrajući spoj dva tijela detaljnije. Zamislimo dva tijela u kontaktu kao na slici 2, sa izolovanim stranama tako da postoji toplotni tok samo u aksijalnom pravcu. Pod stacionarnim uslovima toplotni tok  $q$  kroz oba tijela (materijala) mora biti isti. Praveći energetski bilans na posmatranim tijelima može se prema [1], doći do:

$$q = q_c = \frac{T_a - T_b}{\frac{1}{\alpha_c A}} \quad (1)$$

gdje je  $1/(\alpha_c A)$  (K/W) toplotni kontaktni otpor, a  $\alpha_c$  (W/m<sup>2</sup>K) kontaktni koeficijent, koji igra veoma važnu ulogu u brojnim aplikacijama. Veličine  $T_a, T_b$  su temperature površina u dodiru tijela A i B, respektivno, a  $A$  ukupna površina presjeka dijelova u kontaktu. Stvarna površinska hrapavost vjeruje se da igra centralnu ulogu kod određivanja kontaktnog otpora. Prenos toplote kroz kontaktni spoj dva tijela se odvija putem kondukcije toplote kontakta dva tijela i preko kondukcije kroz zarobljeni gas u praznim prostorima. U tom slučaju kontaktni koeficijent  $\alpha_c$  se može izraziti kao:

$$\alpha_c = \frac{1}{L_g} \left( \frac{A_c}{A} \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{A_v}{A} \lambda_f \right) \quad (2)$$

gdje su  $A_c$  i  $A_v$  površine kontakta dva tijela i praznog prostora respektivno,  $\lambda_1, \lambda_2$  i  $\lambda_f$  koeficijenti kondukcije jednog i drugog tijela i zarobljenog zraka,  $L_g$  debljina praznog prostora. Glavni problem kod ove jednostavne teorije je da je vrlo teško odrediti efektivne vrijednosti  $A_c, A_v$  i  $L_g$  za površine u kontaktu. Cjelovit pregled problema kontaktnog otpora može se naći u literaturi kao na primjer kod [1] [2]. Na žalost, nema zadovoljavajuće teorije koja će predvidjeti toplotni kontaktni otpor za sve tipove materijala u inženjerstvu, niti ima eksperimentalnih studija koje daju pouzdane empirijske korelacije, što je razumljivo, s obzirom da mnogobrojni kompleksni uslovi na površini se mogu susresti u praksi. U ovom radu kod numeričke simulacije kontaktnog otpora ne ulazi se u razmatranje kvaliteta kontaktnih površina, kontaktnog pritiska itd., a što je moguće, nego se kontaktne površine smatraju ravnim površinama, a toplotni otpor se simulira zadavanjem toplotnog fluksa  $\mathbf{q}_c$  na kontaktnim površinama. Naravno, za što vjerniju simulaciju stvarnog procesa kondukcije toplote kroz pregrijač, prethodno opisana teorija kontaktnog toplotnog otpora može nam u tome pomoći.

## 2. MATEMATSKI MODEL

Za izotropan materijal, jednačina bilansa stacionarnog toka toplotne energije [3]:

$$\int_S \lambda \text{grad } T \cdot \mathbf{ds} = 0 \quad (3)$$

gdje je  $\lambda$  termička konduktivnost,  $T$  temperatura,  $S$  površina sistema, a  $\mathbf{s}$  je površinski vektor. Jednačina stacionarne kondukcije (3) je eliptična jednačina i zahtijeva da granični uslovi budu zadani na svim granicama domena. Granični uslovi mogu se klasificirati u dvije grupe:

$$\begin{aligned} \text{Dirichlet} & : T(\mathbf{r}_B) = T_B, \mathbf{r}_B \in \delta\Omega \\ \text{Neumann} & : \text{grad } T(\mathbf{r}_B) = \mathbf{q}_B, \mathbf{r}_B \in \delta\Omega \end{aligned} \quad (4)$$

U izrazima (4)  $\mathbf{r}_B$  je vektor položaja tačke na granici sistema (površina  $S$ ),  $\delta\Omega$  je dio granice sistema na koji se primjenjuje određeni tip graničnih uslova. U situacijama kada problem pokazuje neku vrstu simetrije, u tom slučaju samo dio tijela može biti posmatran i uzet kao proračunski domen. U tom slučaju Neumannov uslov sa  $\mathbf{q}_B = 0$  se primjenjuje na granici.

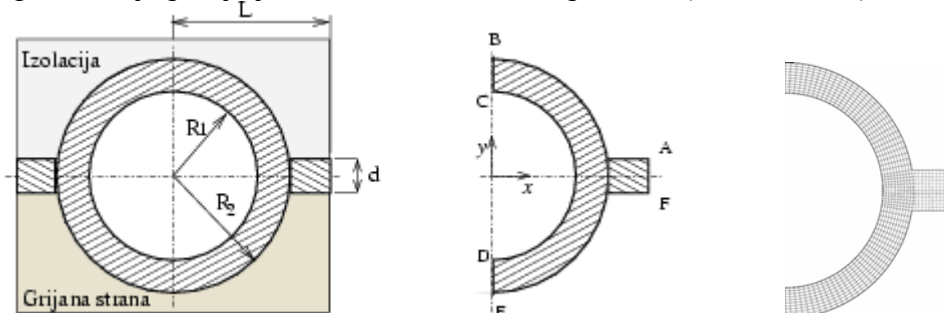
## 3. NUMERIČKI METOD

Analitičko rješenje jednačine (3) postoji za jednostavne slučajeve. Kod problema koji se razmatra u ovom radu neophodno je primijeniti neku od numeričkih metoda. Odabran je

metod konačnih zapremina. Diskretizacioni proces generalno dovodi do sistema nelinearnih algebarskih jednačina i potrebno je primijeniti iterativnu proceduru rješavanja. Ovo obično uključuje neku vrstu linearizacije jednačina, svodeći tako problem na nizove linearnih jednačina problema. Nakon primjene graničnih uslova, linearizacije i dekuplovanja, dobije se sistem linearnih algebarskih jednačina. Primjenjeni diskretizacioni postupak osigurava da matrica sistema ima slijedeća svojstva: dijagonalno je dominantna, simetrična i pozitivno definitna. Za rješavanje sistema linearnih algebarskih jednačina korišten je algoritam poznat pod nazivom *Incomplete Cholesky Preconditioned Conjugate Gradient* metod (ICCG). Više detalja o primjenjenom numeričkom postupku može se naći u referencama [5] i [6].

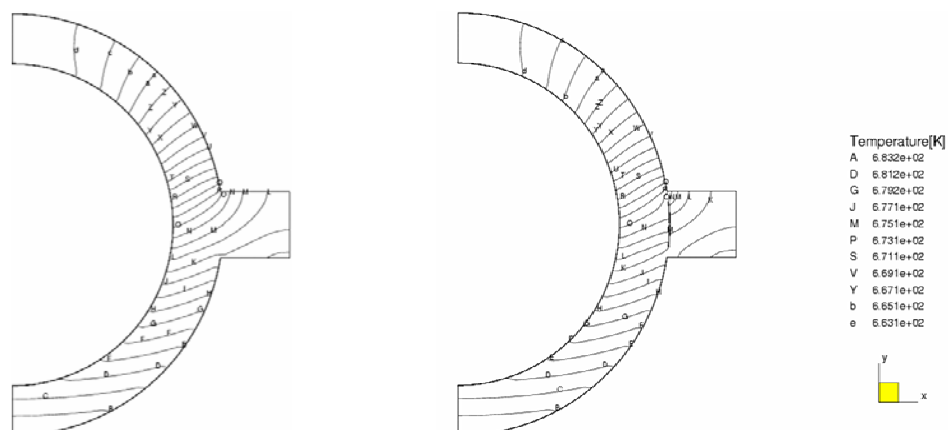
#### 4. PRIMJER PRORAČUNA

Fizikalni model u ovom primjeru je prikazan na slici 3 (lijevo), pretpostavlja se da je zavareni spoj rebra i cijevi izvedena tako da nema dodatnog materijala (uglovi), odnosno da odgovara geometrijskom obliku prikazanom na slici, te da je prožimanje vara izvedeno samo djelimično s bočnih strana rebra. Dimenzionalne oznake modela imaju vrijednosti:  $R_1 = 14,5$  mm,  $R_2 = 19$  mm,  $d = 6$  mm,  $L = 25$  mm. Zbog simetrije dovoljno je posmatrati polovinu modela. Na granicama FA, BC i DE je simetrija, na granici CD je  $\alpha_p = 644,74$  W/m<sup>2</sup>K,  $T_p = 654$  K, na strani dimnih plinova (granica EF), je  $\alpha_g = 48,48$  W/m<sup>2</sup>K,  $T_g = 1023$  K, a strana prema izolaciji kotla (granica AB) je idealno izolovana. Koeffcijent kondukcije  $\lambda = 39,26$  W/mK. Vrijednosti prethodno nabrojanih ulaznih podataka su preuzete iz reference [7]. Domen za proračun je podijeljen na 864 kontrolnih zapremina (slika 3 desno).

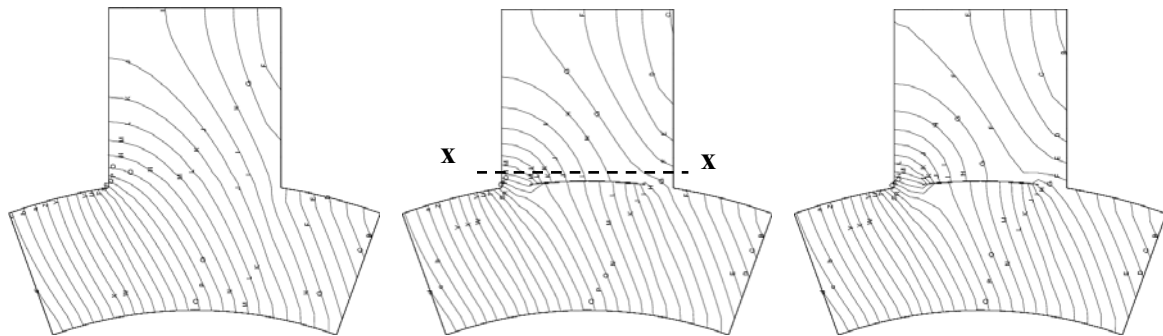


Slika 3: Fizikalni model (lijevo), domen rješavanja s oznakama granica domena (u sredini), numerička mreža – 864 kontrolnih zapremina

Numerički proračun je sproveden za slučajeve kada nema kontaktnog otpora, tri vrijednosti  $q_c$  od 1000, 5000 i 14000 W/m<sup>2</sup>K te kada nema prenosa toplote kroz dodirnu površinu, odnosno kada je termički kontaktni otpor ima beskonačnu vrijednost.

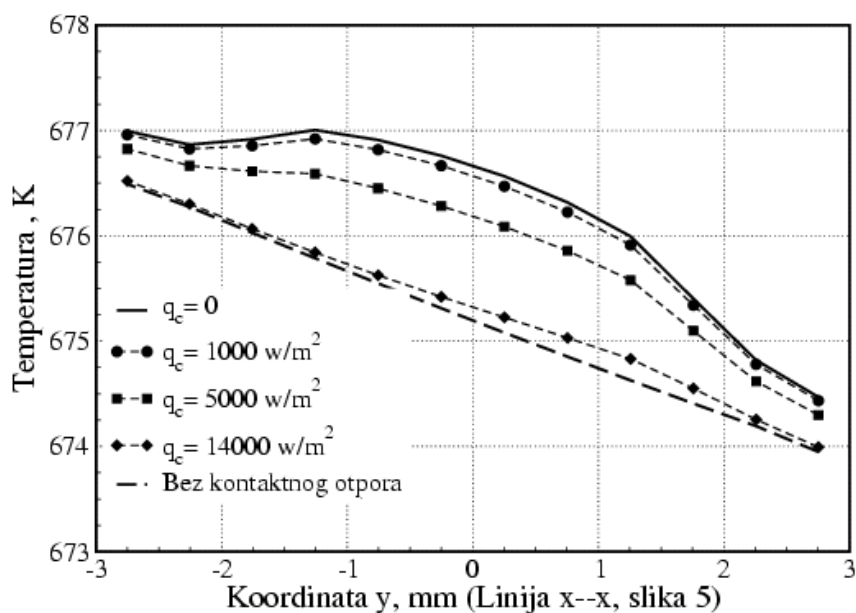


Slika 4: Temperaturno polje u domenu: Bez kontaktnog otpora (lijevo), s termičkim otporom (desno)  
 Za navedene granične uslove, na slici 4, su prikazani rezultati proračuna temperaturnog polja u proračunskom domenu za slučaj bez termičkog kontaktnog otpora (lijevo) i za  $q_c = 0$  (desno). Upoređujući konture temperature dva proračuna na slici 4, vidimo da su konturni nivoi u oba slučaja isti, zbog čega je prikazana samo jedna konturna skala (slika 4 desno) koja važi i za sliku 4 lijevo. To nam olakšava poređenje rezultata dva proračuna. Analizom pozicije pojedinih izoterma kod jednog i drugog slučaja zaključujemo da se razlike pojavljuju jedino u okolini dodira cijevi i rebra i u samom rebro. Termički kontaktni otpor, dakle, ima lokalni efekat na distribuciju temperature u domenu rješavanja kod posmatranog problema.



Slika 5: Temperaturno polje u zoni veze: Bez kontaktnog otpora (lijevo),  $q_c = 5000 \text{ W/m}^2$  (u sredini),  $q_c = 0$  (desno)

Na slici 5 su prikazane konture proračunatog temperaturnog polja u zoni spoja cijevi rebra za tri slučaja: prvo slučaj je kada nema toplotnog kontaktnog otpora tj. pretpostavlja se da nema diskontinuiteta materijala na spoju cijevi i rebra (lijevo), zatim slučaj kada postoji toplotni fluks  $q_c = 5000 \text{ w/m}^2$  kroz dodirnu površinu (u sredini), te slučaj kad nema prolaza toplote kroz dodirnu površinu, odnosno kada je  $q_c = 0$  (desno). Upoređivanjem kontura na slici 5 možemo zapaziti (Slovne oznake pojedinih kontura odgovaraju skali na slici 4) da sa smanjenjem toplotnog fluksa  $q_c$  kroz dodirnu površinu (ili povećanjem toplotnog otpora) nivo temperature u rebro raste, kao i diskontinuitet temperature na dodirnoj površini. Također, može se primjetiti da se gustoća (broja) kontura temperature na povezanom dijelu na strani izolacije, povećava s povećanjem kontaktnog otpora, tj. intenzitet toplotnog fluksa  $q$  raste.



### Slika 6: Temperaturni profil u zoni veze rebra i cijevi

Na slici 6 su prikazani profili temperature  $T$  u blizini dodirne površine cijevi i rebra (strana rebra) za različite vrijednosti toplotnog fluksa  $q_c$  kroz dodirnu površinu. Na slici 6 je također, prikazan i slučaj kada nema diskontinuiteta materijala (odnosno toplotnog otpora) za koji izračunata srednja vrijednost toplotnog fluksa kroz presjek rebra u blizini dodirne površine iznosi oko  $16000 \text{ W/m}^2$  što bi trebala biti "gornja" odnosno maksimalna vrijednost toplotnog fluksa  $q_c$  koju bi mogli zadavati na granicama dodira. Iz odabranih proračuna vidimo da slučaj  $q_c = 14000 \text{ W/m}^2$  (Slika 6) daje rezultat koji je dosta blizu ovog slučaja, tj. temperaturni profili slučaja bez toplotnog kontaktnog otpora i slučaja  $q_c = 14000 \text{ W/m}^2$  su vrlo slični. Prema slici 6 maksimalna temperaturna razlika iznosi oko  $1,5 \text{ K}$  a minimalna oko  $0,5 \text{ K}$ .

## 5. ZAKLJUČAK

Prezentirani model proračuna temperaturnog polja veoma je pogodan za analize i provjeru stacionarnih temperaturnih polja u pregrijačima kada postoji toplotni kontaktni otpor i da se može jednostavno simulirati takva situacija zadavanjem odgovarajućih toplotnih fluksova na kontaktnim površinama djelimično zavarenog spoja cijevi i rebra zidnog pregrijača.

S provedena numerička analiza uticaja toplotnog kontaktnog otpora pokazala je da su promjene u distribuciji temperaturnog polja lokalnog karaktera, s povećanim temperaturnim gradijentima u pojedinim dijelovima zone zavarenog spoja što ima direktne implikacije na raspored i vrijednosti naponskih stanja u materijalu.

Veličina toplotnog kontaktnog otpora može imati veliku ulogu kod provođenja toplote kod nekih uređaja u energetskim postrojenjima i tako uticati na njihove performanse, pouzdanost i radni vijek. Osim toga, generisani termički naponi usljed toplotnog kontaktnog otpora mogu uzrokovati pojavu pukotina u materijalu. Potpunije razumijevanje ponašanja materijala zavarenog spoja pri djelovanju bilo toplotnih ili mehaničkih uticaja, može doprinijeti boljem kvalitetu i performansama proizvoda, te pomoći u procesima njihovog dizajniranja. Iz tih razloga naredne analize ove problematike uključile bi i proračune naponskih stanja.

## 6 LITERATURA

- [1] Hollman J.P., Heat transfer, McGraw-Hill Ltd., 1976.,
- [2] Grujičić M., Zhao C.L., Dusel E.C., The effect of thermal contact resistance on heat management in the electronic packing, *Applied surface science*, 246 290-302, 2005,
- [3] Neimarlija N., Analiza temperaturnih polja i optimiziranje hlađenja matrica kod hladnog izvlačenja osnosimetričnih profila, Magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, 1983.,
- [4] Demirdžić I., Mehanika kontinuuma, Sarajevo, 1998.,
- [5] Demirdžić I., Ivanković A., SA-1996, Lecture notes for the course Finite Volume Stress Analysis, Imperial College London, 1998.,
- [6] Demirdžić I., Muzaferija S., Numerical method for coupled fluid flow, heat transfer and stress analysis using unstructured moving meshes with cells of arbitrary topology, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol.125 235-255, 1995.,
- [7] Neimarlija N., Analiza temperaturnih polja i termalnih napona na karakterističnim vezama dva ili više zidnih pregrijača pare u kotlovima membranskog tipa, Magistarski rad, Sarajevo, 1999.