

UDK 539.32.001.2:621.039.536

Preračuni težkih jeklenih tlačnih posod s postopkom končnih elementov

Andro ALUJEVIČ, Franc KRAMAR, Predrag RISTIĆ

1. UVOD

Za določitev napetosti v velikih jeklenih tlačnih posodah, kakršne so jedrski in procesni reaktorji, imamo na voljo postopek končnih elementov. Kadar je osnovna oblika soda (kotla, bobna, posode ipd.) vrteninska, npr. valj z eliptičnim ali polkrogelnim dnom oz. pokrovom, in je obremenitev osnosimetrična, lahko uporabljamo rotacijske (torusne) končne elemente bodisi navadne ali pa lupinske. Razne cevne priključke, odprtine, ojačitve za obešala in podpore ipd. v steni posode moramo seveda upoštevati posebej kot perturbacijo osnovne napetostne porazdelitve, kar izvedemo z dodatnim izračunom. Kadar navedene podmene niso izpolnjene, si lahko pomagamo s prostorskimi elementi, ki pa so neprimerno dražji, včasih pa take probleme vendarle lahko razrešimo s harmonično obravnavo obremenitev obročnih elementov, razmazom v obodni smeri ipd. Nekaj zamisli je zbranih v tem prispevku, delo pa izvajamo za potrebe RO Institut GOŠA v okviru sodelovanja z GF in MF Beograd, na IJS Ljubljana in VTŠ Maribor.

2. OSNOSIMETRIČNO OBREMENJENI VRTENINSKI ELEMENTI

Z omejitvijo na vrteninske končne elemente z osnosimetrično obremenitvijo in ob izbiri torusnih končnih elementov trikotnega prereza imamo za napetostno analizo na voljo dva termoelastična programa, starejši BREL (kjer mora biti temperaturna porazdelitev znana) in novejši TEMPEST (ki si sam izračuna temperaturno porazdelitev). Osnovne izhodiščne enačbe termoelastičnosti so naslednje

$$\lambda T_{ii}'' + p = c \varrho \dot{T}_i \quad (1)$$

$$\sigma_{ij, j} + f_i = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - \alpha T \delta_{kl}) \quad (3)$$

$$E_{ijkl} = L \delta_{ik} \delta_{jl} + G \cdot (\delta_{ij} \delta_{kl} + \delta_{il} \delta_{kj}) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2} (u_{k, l} + u_{l, k}) \quad (5)$$

pri čemer pomenijo T temperaturo, σ napetosti, ε deformacije, u pomike, f sile, medtem ko so toplot-

ne lastnosti λ prevodnost, c specifična toplota, ϱ gostota, E pa so elastične lastnosti (funkcija bodisi Youngovega modula in Poissonovega števila, bodisi obeh Laméjevih konstant L in G). Označba p pomeni specifično toplotno moč, α pa temperaturno razteznost snovi. Termoelastične probleme najlažje rešujemo z uporabo postopka končnih elementov. Če imamo toplotni del že znan, nam napetostni del opiše enačba

$$K u + f_t = f \quad (6)$$

kjer so sile f znane, pomiki u iskani, medtem ko sta K togost in f_t termična sila dani s seštevkom prispevkov posameznih vrteninskih končnih elementov triangulacijske mreže za meridianski prerez obravnavanega telesa (posode ipd.).

V vrstičnem zapisu se togostna matrika, ki ima $7.6/2 = 21$ členov, glasi (dopolnjeno glede na literaturo [1]):

$$\begin{aligned} K_{qp}^{mn} = & 2 \pi \bar{r}_e A_e \left\{ L \frac{\partial N^m}{\partial q} \frac{\partial N^n}{\partial q} + G \frac{\partial N^m}{\partial p} \frac{\partial N^n}{\partial p} \right. \\ & + G \left(\frac{\partial N^m}{\partial q} \frac{\partial N^n}{\partial p} + \frac{\partial N^m}{\partial p} \frac{\partial N^n}{\partial q} \right) \delta_{qp} + \\ & + \left[L \left(\frac{\partial N^n}{\partial r} \frac{N^n}{r_e} + \frac{N^m}{r_e} \frac{\partial N^m}{\partial r} \right) + (L + 2G) \frac{N^n}{r_e} \frac{N^m}{r_e} \right] \cdot \\ & \cdot \delta_{rp} + L \left(\frac{\partial N^n}{\partial z} \frac{N^m}{r_e} \delta_{qz} + \frac{\partial N^m}{\partial z} \frac{N^n}{r_e} \delta_{zp} \right) \Big\} \\ & (m, n) = i, j, k \quad (q, p) = r, z \quad (7) \end{aligned}$$

medtem ko so termične sile v vrstičnem zapisu (6 členov)

$$\begin{aligned} f_q^n = & -2 \pi \bar{r}_e A_e \alpha T (3L + 2G) \left(\frac{\partial N^n}{\partial q} + \frac{N^n}{r_e} \delta_{rq} \right) \\ & n = i, j, k \quad q = r, z \quad (8) \end{aligned}$$

pri čemer smo predpostavili izotropnost snovi. Označbi $\bar{r}_e$ in A_e pomenita polmer težišča oz. ploščino trikotnika.

Če želimo obravnavati nesimetrično obremenjenje vrtenine, je treba togost in sile obravnavati kot posamezne harmonične komponente ter izraza (7) in (8) ustrezno dopolniti z več členi.

3. TERMIČNA ANALIZA POSODE S KONVEKCIJSKIM ROBOM

Med osnovnimi podatki, ki jih potrebujemo za določitev napetosti v tlačnih posodah in drugih komponentah jedrskih in procesnih reaktorjev, je porazdelitev temperaturnega polja ob ustreznih robnih pogojih. Za ta namen smo uporabili obstoječ (svoj) računalniški program TEMPEL [2, 3], najprej ločeno kot samostojno enoto, nato pa kot sprednji podprogram v enotnem programu TEMPEST [4, 5], skupaj z BREL napetostnim programom [6, 7, 8].

Temperaturno polje v sodu je zelo odvisno od podatkov o temperaturi fluidov, ki oblivajo stene soda zunaj in znotraj, podane pa morajo biti tudi ustrezne vrednosti toplotne prestopnosti z vode na steno oz. s stene na zrak. Pri testiranju programa smo predpostavili, da na celotnem notranjem robu posode že poznamo temperaturo površine (324 °C). Toplotna prevodnost v jeklu je približno 40 W/mK, medtem ko naj bi bila zunanja temperatura zraka 300 °C. Toplotno prestopnost s stene na plin smo ocenili tako, da je v valjastem delu posode zunanja površina ogreta na 320 °C. Kratek izračun prestopnosti pove, da je ustrezna toplotna prestopnost

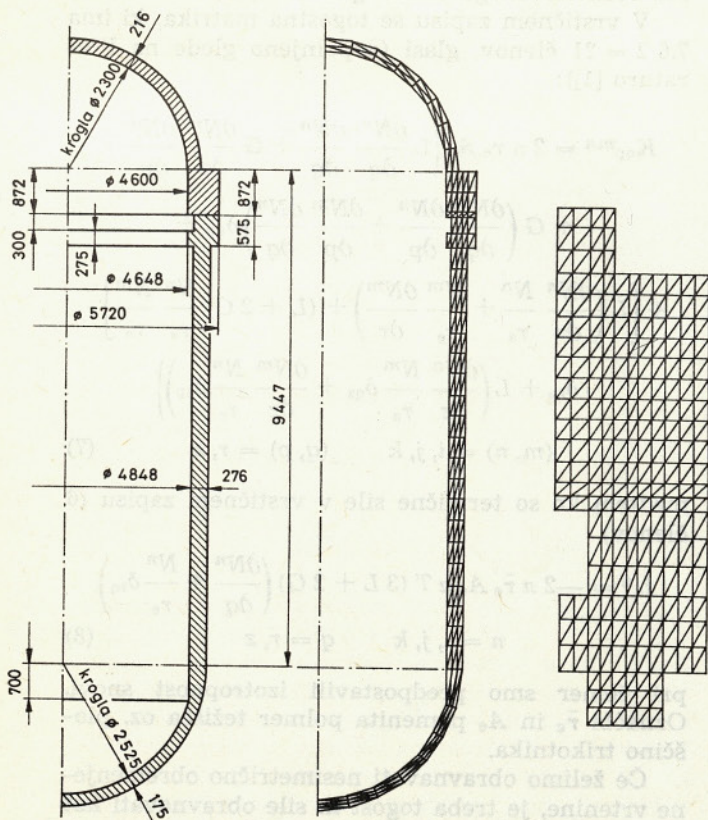
$$\alpha = \frac{\lambda \cdot (T_n - T_z)}{\Delta \cdot (T_z - T_0)} = \frac{40 (324 - 320)}{0,276 (320 - 300)} = 29 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Toplotne vire v materialu soda smo zanemarili. Velja pripomniti, da v programu TEMPEL lahko brez težav izvedemo spremembo danih vrednosti.

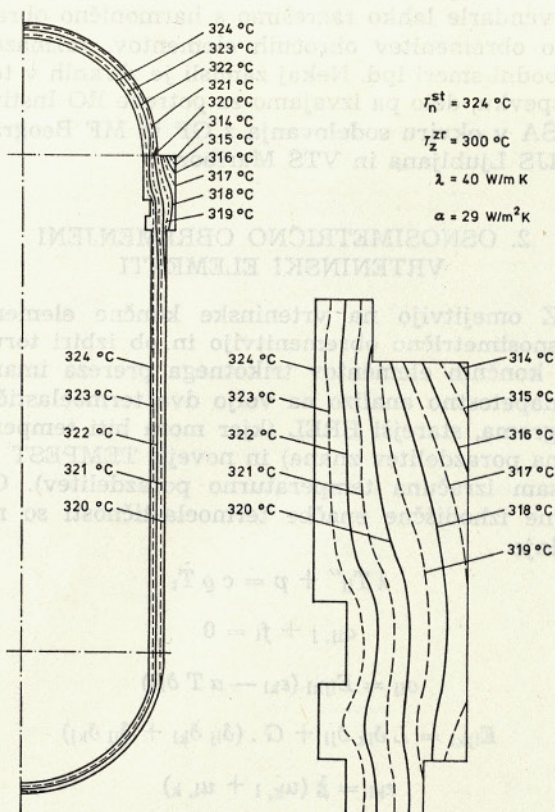
Z izbranimi podatki smo določili stacionarno temperaturno polje v meridianskem prerezu soda. Slika 1 prikazuje prerez posode (izmere, mrežo in detajl mreže končnih elementov). Ustrezni rezultati so prikazani na sliki 2 (izoterme v celotnem prerezu in v detajlu). Čisti računalniški stroški izračuna posode z 242 končnimi elementi (168 vozlišč) so oktobra 1978 na CYBER 72 znašali 158 din, stroški izračuna detajla s 444 elementi (260 vozlišč) pa 198 din. Analizo temperatur je opravil F. Kramar za diplomsko delo [9], za katero je v aprilu t. l. prejel študentsko Kidričevo nagrado Univerze v Mariboru.

4. NAPETOSTNA ANALIZA POSODE (OPIS PROGRAMA BREL)

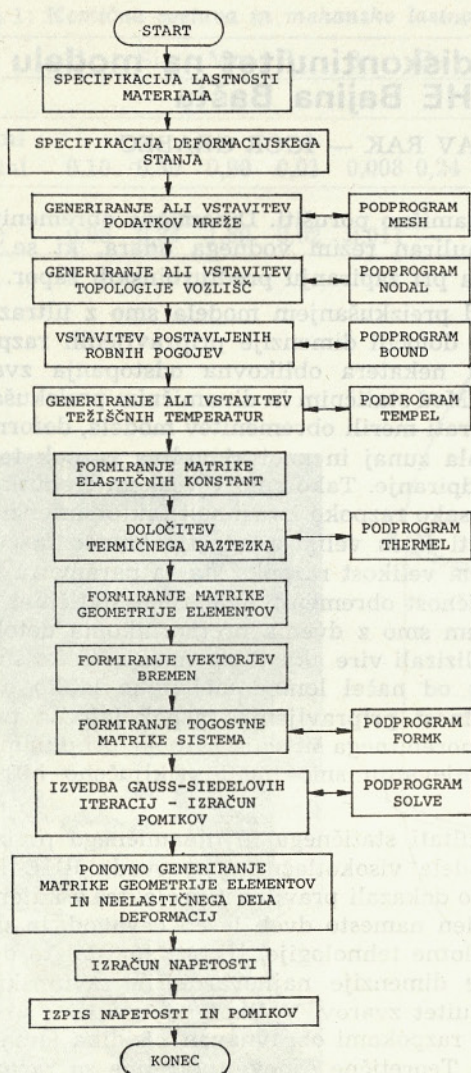
Zasnovo programa BREL [6, 7, 8], ki sestavlja sedaj tudi zaključni del termoelastičnega programa TEMPEST, smo uporabili za napetostne izračune



Sl. 1. Geometrija prereza in mreža elementov



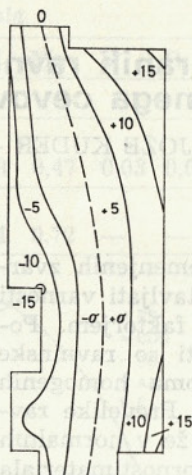
Sl. 2. Izoterme v prerezu posode in prirobnici



Sl. 3. Diagram poteka napetostnega programa BREL s postopkom končnih elementov

je klenne reaktorske posode. Potek delovanja uporabljenega programa BREL je mogoče prikazati najpreprosteje z diagramom, ki je podan na sliki 3 iz vira [10].

Rezultati termičnih napetosti v meridianskem prerezu tlačnega soda (detajl prirobnic) so prikazani na sliki 4. Cena izračuna (583 elementov, 356 vozlov) je julija 1979 na CYBER 72 bila 3713 dinarjev. Ugotovljene vrednosti obročnih napetosti pri čisti temperaturni obremenitvi (glej sliko 3) so prvi korak pri obsežnejših napetostnih izračunih tlačnih posod.



Sl. 4. Obročne napetosti v detajlu prirobnic soda
+ σ nateg, - σ tlak (N/mm²)

5. SKLEP

Na opisani način smo v sodelovanju z R. O. Institut »GOŠA« iz Beograda začeli v letošnjem letu izvajati obširnejše študije sodov za jedrske, kemijske in petrokemijske reaktorje. Po dogovoru je nosilec napetostnega dela Građevinski fakultet Beograd (prof. dr. M. Sekulović), termični dela pa izvajamo na Visoki tehniški šoli v Mariboru in na Inštitutu Jožef Stefan v Ljubljani.

LITERATURA

- [1] A. K. Gupta, B. Mohraz, »A Method of Computing Numerically Integrated Stiffness Matrices«, Numerical Methods in Engineering, 5 (1972), pp. 83—89.
- [2] A. Alujevič, E. Eysink, J. Head, »TEMPEL — program končnih elementov za izračunavanje temperaturnih polj«, Strojniški vestnik, 20 (1974), str. 161—164.
- [3] A. Alujevič, P. Škerget, »Robni pogoji druge in tretje vrste v programu TEMPEL«, Strojniški vestnik, 24 (1978), str. 205—208.
- [4] P. Škerget, A. Alujevič, »TEMPEL Code for Simultaneous Temperature and Stress Analysis«, IJS-DP-1441 (1978).
- [5] A. Alujevič, P. Škerget, B. Vrečko, »Sinteza dveh MKE programov za toplotno in napetostno analizo«, 23. konf. ETAN, Maribor 1979.
- [6] A. Alujevič, »Postopek končnih elementov za računanje termičnih napetosti«, Strojniški vestnik, 19 (1973), str. 169—173.
- [7] A. Alujevič, »Program konačnih elemenata BREL za analizo termičnih napona«, Termotekhnika, 3 (1977), str. 18—22.
- [8] A. Alujevič, B. Černež, »Določitev napetosti pri stiku dveh sosrednjih vrtenin«, Strojniški vestnik, 25 (1979), str. 1—4.
- [9] F. Kramar, »Robni pogoji tretje vrste na površini posode jedrskega reaktorja NE Krško«, diplomsko delo, VTS Maribor, 1978.
- [10] B. Černež, »Uporabniški priročnik programa BREL za termične napetosti, IJS-DP-1243 (1977).

Naslovi avtorjev: izr. prof. dr. Andro Alujevič, dipl. ing.
in Franc Kramar, dipl. ing.
VTO strojništvo VTS Univerze v Mariboru
in Inštitut Jožef Stefan Univerze v Ljubljani
ter Predrag M. Ristić, dipl. ing.
RO Institut »GOŠA«, Sektor TSPP, Beograd