

UDK 539.4:621.181.65

Trdnostna in metalurška analiza poškodb na membranskih cevni stenah visokotlačnega parnega kotla

I. DEL — TRDNOSTNA ANALIZA

L. ANDRÉE, M. ŠKERLJ, F. KOSEL

1. UVOD

Pri vse večjih kotelskih napravah, ki se pojavljajo v vedno večjem številu v zvezi z nenehnim naraščanjem porabe električne energije, postaja njihova gradnja vse bolj problematična. Poleg montažnega sistema gradnje, pri katerem je čim več sestavnih delov izdelanih že v tovarni, uporabljal pa se je tudi že pri kotlih s klasično obzidavo, so bili potrebni še novi ukrepi za pocenitev gradnje tako velikih kotlov. To so predvsem novi konstrukcijski elementi za gradnjo kotlov: membranske cevne stene. Ni naključje, da so se razvili prvi veliki parni kotli po novih načelih gradnje v ZDA, ki so prve po velikosti takih objektov. Tak montažni sistem gradnje je dokaj hitro prodril v Evropo in pred kratkim tudi v Jugoslavijo.

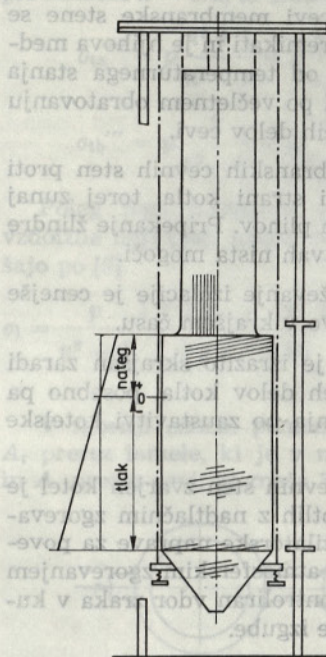
Značilnost velikih parnih kotlov je v prvi vrsti v tem, da so vse stene kurišča, tj. uparjalnika, izdelane v obliki plinsko tesnih membranskih cevni sten, ki sestavljajo nekak plašč kotla s prizmatično obliko. Višine teh kotlov tako imenovane stolpne izvedbe pogosto presegajo 100 m. Konstrukcija je brez vsakršne obzidave in visi prosto na nosilcih, ki slonijo na jeklenih stebrih skeleta (ozir. ogrodja). Temperaturno raztezanje znaša okrog 400 mm in mora biti omogočeno navzdol.

Teža kompletne kotelske naprave s parnim kotlom stolpne izvedbe na prisilni pretok in s kurjavo na lignit za 1000 t/h pare, ki ustreza bloku za 300 MW, je od 12 200 do 13 500 t. Teža je razporejena na različne dele kotelske naprave takole:

	%
tlačni sistem	20,5 ... 21,5
kurjava	17,5 ... 20
grelnik zraka in elektrofilter	10,5 ... 10,5
črpalke, ventilatorji in drob.	3,5 ... 5
skelet, stopnice in kanali	23,5 ... 23
obzidava in izolacija	19 ... 15
cefovodi	5,5 ... 5

Prav gotovo je zanimiv tudi podatek, da je v takem kotlu nad 300 km cevi različnih premerov. Te cevi so spojene z nad 75 000 zvarov, od katerih je okrog 2/3 delavniških zvarov, preostali pa so montažni zvari.

Na sliki 1 je shematično prikazana zanimiva konstrukcija takega kotla. Spodnji, širši del sta kurišče in uparjalnik, zgornji del pa je konvektivni kanal, v katerem so nameščeni pregrevalniki in



Slika 1

grelniki vode. Ta del je nekoliko zožen zaradi boljšega prenosa toplote, ker so že nekoliko ohlajeni plini prisiljeni k večji hitrosti pretakanja. Spodnji del kotla ima membranske cevne stene s poševnimi cevmi; zgornji del pa z navpičnimi cevmi.

Membranske cevne stene so iz plošč, ki jih sestavljajo cevi, povezane med seboj z lamelami. Lamelle so na cevi privarjene po vsej dolžini, tako da je stena popolnoma tesna in je lahko v kurišču kotla tudi nadtlak. Tako odpade potreba po obzidavi, seveda pa so stene kotla na zunanji strani izolirane, da zmanjšamo toplotne izgube.

Zato, da membranske cevne stene kurišča ne bi bile obremenjene v svojem zgornjem delu s vso težo spodnjega dela, se del teže slednjega prenaša prek podporne konstrukcije jaška kurišča in nateznih trakov, prek zgornjih membranskih cevni sten in prek zunaj ležečih vešalnih cevi na nosilce nosilne konstrukcije. Ta izvedba podpore povzroča, da je obremenjen zgornji del membranskih cevni sten kurišča na nateg, spodnji del pa na tlak. Da bi preprečili dodatne temperaturne obremenitve, se morajo seveda te konstrukcije in natezni trakovi prilagajati temperaturnim spremembam membranskih cevni sten.

Neposredne prednosti takega sistema gradnje velikih parnih kotlov so naslednje:

1. Relativno manjša je toplotna kapaciteta, krajša zakurilna doba in hitrejša ohlajanje ob zaustavitvi kotla.

2. Membranske cevne stene z dimenzijami, kakršne ustrezajo vagonskemu prevozu, izdelamo v tovarni s polavtomatičnimi varilnimi stroji. S tem zboljšamo kakovost izdelave ob manjši ceni.

3. Skupaj zvarjene cevi membranske stene se medsebojno ne morejo premikati in je njihova medsebojna lega neodvisna od temperaturnega stanja kotla. Zato so stene tudi po večletnem obratovanju gladke in brez izstopajočih delov cevi.

4. Vse ojačitve membranskih cevni sten proti izbočenju so na zunanji strani kotla, torej zunaj vpliva plamena in vročih plinov. Pripekanje žlindre in korozija na teh ojačitvah nista mogoči.

5. Polaganje in vzdrževanje izolacije je cenejše od obzidave ter izvedljivo v krajšem času.

6. Čas za popravila je izrazito skrajšan zaradi lahkega pristopa do vseh delov kotla, posebno pa zaradi hitrejšega ohlajanja po zaustavitvi kotelske naprave.

7. Iz membranskih cevni sten zvarjen kotel je popolnoma tesen. Pri kotlih z nadtlacnim zgorevanjem niso potrebne ventilatorske naprave za povečanje vleka, pri kotlih z atmosferskim zgorevanjem pa ni nevarnosti za nekontroliran vdor zraka v kurišče in s tem za dodatne izgube.

8. Delo pri montaži je krajše kakor pri kotlih z obzidavo.

9. Kotli s stolpno izvedbo potrebujejo za postavitve relativno majhno osnovno ploskev.

Seveda pa ima taka gradnja tudi nekaj slabih lastnosti, med katerimi zavzema prvo mesto zapleten in še ne popolnoma dodelan trdnostni izračun membranskih cevni sten predvsem pri poševni legi cevi. Cevi, ki so sestavni del teh membranskih sten, so obremenjene poleg z notranjim tlakom vode ozir. pare in s temperaturnimi napetostmi še z znatnimi dodatnimi obremenitvami. To zaradi tega, ker nosijo membranske cevne stene celotno težo spodaj ležečega dela kotla z vodo in pepelom vred. Te dodatne obremenitve so posebno neugodne prečno na cevi, tj. pri poševni legi cevi. V zvezi s tem je zelo pomembna ugotovitev, da ne pomenijo membranske cevne stene z navpično postavljenimi cevmi glede trdnosti nobene problematike. Tu so namreč membranske cevne stene obremenjene v smeri, v kateri so najbolj nosilne.

2. TRDNOSTNE RAZMERE V MEMBRANSKIH CEVNIH STENAH

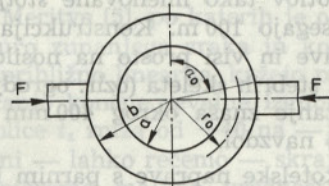
Pri parnih kotlih z naravno cirkulacijo so cevi v membranski cevni steni navpične; pri parnih kotlih na prisilni pretok pa imajo cevi lahko po-

ljubno lego. Pri parnem kotlu po sliki 1 sta kombinirani obe možnosti.

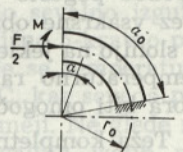
Ves zgornji del kotla je sestavljen iz membranskih cevni sten, v katerih potekajo cevi navpično. Napetosti v teh cevih so sestavljene iz normalnih napetosti v cirkularni (tangencialni) smeri zaradi notranjega tlaka vode ozir. pare ter vzdolžnih normalnih napetosti zaradi dodatnih obremenitev. Vsota vseh teh napetosti skupaj s temperaturnimi napetostmi praktično nikoli ni posebno velika in ta del kotla trdnostno ne povzroča posebnih težav.

Drugače pa so razmere v spodnjem delu kotla (kurišču in uparjalniku). Nekatere tovarne izdelujejo ta del kotla tako, da potekajo cevi spiralno z zelo majhnim naklonskim kotom (okrog 10°). S tem pridobijo enakomernjšo temperaturno obremenitev celotnega uparjalnika. Pri tako majhnem kotu lahko brez večjih napak vzamemo, da ležijo cevi vodoravno in je taka membranska cevna stena obremenjena tudi v prečni smeri glede na os cevi. Te obremenitve pa povzročajo v cevih dodatne upogibne napetosti, ki po velikosti lahko znatno presegajo primarne napetosti zaradi notranjega tlaka. Poleg tega se lahko pojavijo težave zaradi dodatnih rahlih torzijskih deformacij kurišča kotla, do katerih pride pri temperaturnem raztezanju.

Vzemimo del membranske cevne stene z dolžino 1 cm po sliki 2.



Slika 2



Slika 3

Zaradi dvojne simetrije računamo samo četrtno vsega prereza po sliki 3. Zaradi simetrije in privarjene lamele lahko vzamemo, da je cev pri $\alpha = \alpha_0$ vpeta, prav tako terja simetrija, da bo pri $\alpha = 0$ tudi

$$\frac{\partial v}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

če označimo z v premik v cirkularni smeri. Robne pogoje pri $\alpha = \alpha_0$ in $r = r_0 = (a + b)/2$ pa lahko napišemo takole

$$u = v = \frac{\partial v}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

Pri tem je z u označen premik v radialni smeri.

Robni pogoj (1) pomeni v bistvu, da mora ostati prerez pri $\alpha = 0$ navpičen. Za ravnotežje v tem prerezu mora biti prisoten upogibni moment M . Celotno cirkularno napetost zaradi sile F [kp/cm] lahko izrazimo z vsoto

$$\sigma_t = \sigma_t' + \sigma_t'' \quad (3)$$

kjer pomeni σ_t' cirkularno napetost, ki se spreminja s kotom α in znaša po [1]

$$\sigma_t' = \frac{F}{2N_1} \left[3r - a^2 b^2 \frac{1}{r^3} - (a^2 + b^2) \frac{1}{r} \right] \cos \alpha \quad (4)$$

pri čemer je

$$N_1 = a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a} \quad (5)$$

Tudi izraz za napetost σ'' , ki je neodvisen od kota α , je že znan in je po [1] in [2]

$$\sigma_t'' = \frac{L}{2(b^2 - a^2)} \cdot \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} K \quad (6)$$

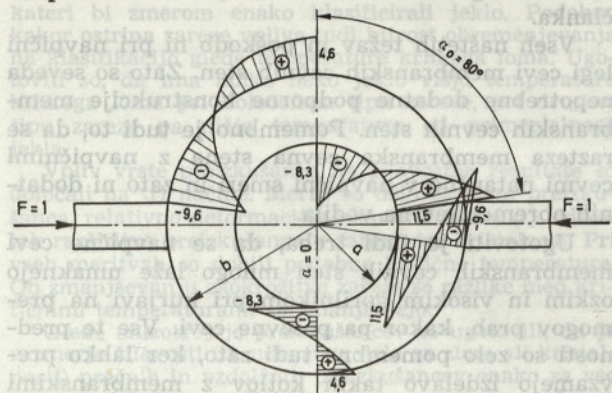
kjer pomenita

$$L = -\frac{F}{2N_1} \cdot$$

$$\cdot \left[r_0(5 + \nu) + \frac{a^2 b^2}{r_0^3} (l + \nu) + \frac{1}{r_0} (a^2 + b^2) (1 - \nu) \right] \quad (7)$$

$$K = \left(-\frac{a^2 b^2}{r^2} \ln \frac{b}{a} + b^2 \ln \frac{r}{b} + a^2 \ln \frac{a}{r} + b^2 - a^2 \right) \quad (8)$$

Če izračunamo cirkularno napetost po zgornjih enačbah za konkreten primer cevi z zunanjim premerom 31,8 mm in debelino stene 4,5 mm, dobimo razporeditev napetosti, kakor jo prikazuje slika 4 v kp/cm².



Slika 4

Radialne in tangencialne (strižne) komponente napetosti so v primerjavi s cirkularnimi zanemarljive. V primeru, če bi bila sila F natezna, bi se v diagramih samo spremenili vsi predznaki. S slike izhaja, da se največje napetosti pojavljajo na notranjem robu v prerezu α_0 .

Drugi maksimum je na zunanji strani stene cevi prav na mestu, kjer je zvarjena z lamelo. Tretje kritično mesto je na notranjem robu pri kotu $\alpha = 0$. Pravilnost tega računa dokazujejo metalurške raziskave, ki so obdelane v drugem delu tega članka in kažejo največje napetostne korozijske razjede prav na teh mestih.

Seveda je cev membranske stene parnega kotla obremenjena še z notranjim tlakom, ki povzroča vedno natezne napetosti, ki so na notranji steni cevi večje od napetosti na zunanji steni. Predpostavimo v našem računskem primeru tlak pare p kp/cm². Po znanih enačbah za debele cevi pod tlakom dobimo napetosti na notranjem in zunanjem polmeru pri označbi $n = b/a$, ki znaša v našem primeru 1,395.

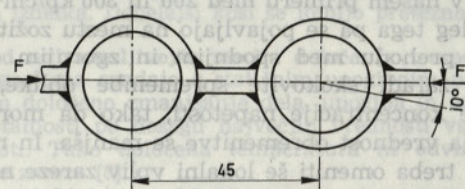
$$\sigma_{ta}''' = p \frac{n^2 + 1}{n^2 - 1} = p \frac{2,95}{0,95} = 3,1 p \text{ kp/cm}^2 \quad (9)$$

$$\sigma_{tb}''' = p \frac{2}{n^2 - 1} = p \frac{2}{0,95} = 2,1 p \text{ kp/cm}^2 \quad (10)$$

Poleg tega nastajajo v ceveh in lamelah še vzdolžne napetosti zaradi notranjega tlaka, ki znašajo po [3]

$$\sigma_l = \frac{p}{n^2 - 1} \frac{1 + 2\nu\gamma}{1 + \gamma} = \frac{p}{0,95} \frac{1 + 0,6 \cdot 0,2045}{1,2045} + 0,983 p \quad (11)$$

V zgornji enačbi pomeni $\gamma = A_r/A_c$; pri tem je A_r prerez lamele, ki je v našem primeru 0,79 cm², in A_c prerez cevi, ki znaša 3,86 cm².



Slika 5

Za osnovo našega računa smo vzeli membransko cevno steno po sliki 5 z naslednjimi podatki:

za cevi: material 15 Mo 3, $\nu = 0,3$
zunanji premer 31,8 mm
notranji premer 22,8 mm
delitev 45 mm

za lamele: material 15 Mo 3
debeline 6 mm
širina 13,2 mm

Lamele so obojestransko privarjene na cev. Notranji tlak naj bo $p = 205$ kp/cm² pri temperaturi 375 °C.

Na najbolj obremenjenem mestu, ki leži na notranjem obodu cevi pod zvarom (pri $\alpha_0 = 80^\circ$), bo ob zanemaritvi temperaturnih in strižnih napetosti

$$\sigma_{ta}''' = 3,1 \cdot 205 = 635 \text{ kp/cm}^2$$

$$\sigma_l = 0,983 \cdot 205 = 202 \text{ kp/cm}^2$$

$$\sigma_t = 11,5 \cdot F \text{ kp/cm}^2$$

Pri tem pomeni F prečno silo v membranski cevni steni na 1 cm dolžine. Tako imamo prostorsko napetostno stanje z glavnimi napetostmi $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

$$\sigma_1 = 635 + 11,5 F \text{ kp/cm}^2$$

$$\sigma_2 = 202 \text{ kp/cm}^2$$

$$\sigma_3 = -205 \text{ kp/cm}^2$$

Porušitvena hipoteza največjih strižnih napetosti nam da primerjalno napetost

$$\sigma_p = \sigma_1 - \sigma_3 = 635 + 11,5 F + 205$$

$$\sigma_p = 840 + 11,5 F \quad (12)$$

(9) Material 15 Mo 3 ima po [3] mejo plastičnosti pri temperaturi 375 °C $\sigma_v = 1800 \text{ kp/cm}^2$, ki nam da pri 1,5-kratni varnosti dopustno napetost 1200 kp/cm^2 . S to vrednostjo lahko izračunamo iz enačbe (12) dopustno dodatno obremenitev F

$$F = \frac{1200 - 840}{11,5} = 31,3 \text{ kp/cm}$$

ali $F = 3130 \text{ kp/m}$. Ta obremenitev je osnovni podatek za določanje števila in nosilnosti konstantnih obešal za razbremenitev membranske cevne stene v spodnjem delu kotla.

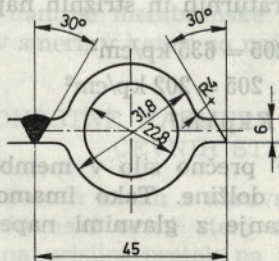
Tako izračunana obremenitev F pomeni vsekakor zgornjo mejo, ker so bile v računu zanemarene temperaturne napetosti, katerih velikostni red znaša v našem primeru med 200 in 300 kp/cm^2 .

Poleg tega pa se pojavljajo na mestu zožitve, to je na prehodu med spodnjim in zgornjim delom kotla, zaradi skokovite spremembe oblike, tudi znatne koncentracije napetosti, tako da mora biti srednja vrednost obremenitve še manjša. In nazadnje je treba omeniti še lokalni vpliv zareze na mestu, kjer je osnovni material cevi oslabiljen z zvarom kakor tudi prekrystalizacijo materiala.

Za ponazoritev, kako zelo upade trdnost cevi zaradi vzdolžno navarjene lamele, navajamo rezultate preizkusov s trnom (30°). Pri prvem preizkusu je bil preizkušane normalna cev $\varnothing 31,8 \times 4,5 \text{ mm}$ iz materiala 15 Mo 3. Porušitev se je pojavila pri sili 19 Mp. Za drugi preizkus je bil izrezan preizkušane iz membranske cevne stene z enako dimenzijo cevi in iz enakega materiala. Do porušitve je prišlo že pri sili 6,9 Mp. Cev je raztrgalo na enem od štirih zvarov, to je tam, kjer so obremenitve največje tudi po zgornjem računu.

Navedeni negativni vplivi skupaj z največjo napetostjo prav na tem mestu so vzroki za zlome v okolici zožitve.

V zadnjem času so se pojavile na tržišču tako imenovane »plavutne cevi« (Flossenrohre). Pri njih



Slika 6

so prevzele funkcijo lamel plavuti, ki so izdelane obenem s cevjo in s hladnim valjanjem. Vsi negativni vplivi varjenja so premaknjeni iz ogroženega področja v plavut samo, ki je redno veliko manj obremenjena. Izkušnje in preizkusi kažejo, da prenesejo take cevi dejansko precej večje obremenitve in so zato zelo dober material za popravila.

SKLEP

Pri parnih kotlih z membranskimi cevnimi stenami, pri katerih so cevi poševne, so te seveda obremenjene v prečni smeri. V tej smeri pa so cevi manj nosilne tudi zaradi vara (= poškodbe) med cevjo in lamelo. Da bi se izognili prevelikim obremenitvam, so potrebne posebne dodatne podporne konstrukcije.

Prav tako je razumljivo, da se ne razteza kurilna komora iz membranskih cevni sten s poševnimi cevmi preprosto v navpični smeri, temveč se tudi odvija oziroma zavija okoli navpične osi kurilne komore. To pa povzroča dodatne obremenitve vodil, ki omogočajo raztezanje kurilne komore samo v navpični smeri. Torej dodatno obremenjena vodila pravzaprav ovirajo raztezanje kurilne komore.

Nadaljnja značilnost za konstrukcijo kotlov te vrste je tudi ta, da je nastalo pretežno število poškodb cevi membranske cevne stene na področju zožitve kurilne komore in ob zaustavitvi kotla. Vse te poškodbe cevi membranskih cevni sten so z metalurškega stališča analizirane v II. delu tega članka.

Vseh naštetih težav in poškodb ni pri navpični legi cevi membranskih cevni sten. Zato so seveda nepotrebne dodatne podporne konstrukcije membranskih cevni sten. Pomembno je tudi to, da se razteza membranska cevna stena z navpičnimi cevmi natančno v navpični smeri in zato ni dodatnih obremenitev na vodila.

Ugotoviti je tudi treba, da se navpične cevi membranskih cevni sten mnogo lažje umaknejo ozkim in visokim gorilnikom pri kurjavi na premogov prah, kakor pa poševne cevi. Vse te prednosti so zelo pomembne tudi zato, ker lahko prevzamejo izdelavo takih kotlov z membranskimi cevni stenami z navpično lego cevi domača podjetja z mnogo manjšim tveganjem, kakor pa bi to bilo pri kotlih z membranskimi cevni stenami s poševnimi cevmi.

LITERATURA

- [1] Timoshenko: Teorija elastičnosti.
- [2] Linzer: EVT Bericht 13/73.
- [3] Babcock Dürr VKW: Auslegung, Konstruktion und Fertigung von Dampferzeugern mit gasdicht geschweißten Rohrwänden.

Naslov avtorjev: prof. ing. Leopold André, prof. dr. ing. Marko Škerlj, doc. dr. ing. Franc Kosel, vsi: Fakulteta za strojništvo, Univerze v Ljubljani