Mr Zoran Ristić,
potpukovnik, dipl. inž.
Spec. Milisav Jakovljević,
potpukovnik, dipl. inž.

ODREĐIVANJE PARAMETARA NAPREZANJA VIŠESLOJNE CEVI ORUĐA

U radu je obrađen postupak za određivanje stanja napre-
zanja i optimalnih vrednosti radijusa i relativnog stezanja
među slojevima sastavljive višeslojne cevi. Definišu je po-
lazne veličine i algoritam za proračun pomoću PC računara.
Proračunate veličine i parametri višeslojne cevi prikazani
su na primeru odabranog kalibra cevi.

Uvod

Višeslojna cev, izvedena sastavlja-
njem cevi sa jednom ili n navlake (o-
motača), uz optimalno stezanje na kon-
taktnim radijusima, u odnosu na mono-
blok cevi istih dimenzija, ima veću e-
lastičnu otpornost. Pri sastavljanju pri-
menom odgovarajuće tehnologije, radi
uspostavljanja kontaktnih pritisaka iz-
među slojeva, sastavljanje se izvodi ra-
dijalnim preklapanjem. Radi toga, u-
nutrašnji radijus navlake je manji od
spoljašnjeg radijusa cevi (sloja) na koji
se navlaka postavlja. Razlika među o-
vim radijusima predstavlja stezanje Δ_i ,
sl. 1.

Sl. 1 — Sastavljanje slojeva cevi

Ako se promene veličina radijusa
sloja cevi i navlake, posle sastavljanja
na kontaktnom radijusu r_k ($r_{1s} > r_k > r_2$),
označe sa:

$2\delta r_{1s}$ — smanjenje spoljašnjeg prečni-
ka cevi;

$2\delta r_2$ — povećanje unutrašnjeg prečni-
ka navlake,

onda je stezanje između njih:

$$\Delta_2 = 2 (\delta r_2 + \delta r_{1s})$$

Veličina stezanja na spoju cevi sa
navlakom može se izraziti i preko od-
govarajućih deformacija.

Ako su relativne tangencijalne de-
formacije za cev i navlaku [1]:

$$\varepsilon_{\tau_{1s}} = \frac{\delta r_{1s}}{r_{1s}} \text{ i } \varepsilon_{\tau_2} = \frac{\delta r_2}{r_2},$$

onda će na kontaktnom radijusu (ako
je $r_{1s} = r_2$), potrebna veličina apsolut-
nog stezanja biti:

$$\Delta_2 = 2r_2 (\varepsilon_{\tau_2} + \varepsilon_{\tau_{1s}})$$

Analognim razmatranjem, u sluča-
ju sastavljanja cevi sa drugom navla-
kom (troslojna cev), između drugog i
trećeg sloja veličina stezanja Δ_3 je:

$$\Delta_3 = 2r_3 (\varepsilon_{\tau_3} + \varepsilon_{\tau_{2s}})$$

Svako stezanje Δ_i na spoju omo-
tača i cevi ili, uopšte, između slojeva
izaziva odgovarajuće veličine kontak-
tnog pritiska p_k u stanju mirovanja. U-
sled kontaktnih pritisaka, u slojevima
cevi nastaje prednaponsko stanje na-
prezanja. Ako se ovakva cev optereti
pritiskom opaljenja, dolazi do superpo-

niranja stanja naprezanja u mirovanju sa naprezanjima od opaljenja. Rezultujuće ili ukupno naprezanje na unutrašnjem kanalu cevi se smanjuje, čime se stvara veća rezerva čvrstoće cevi u odnosu na monoblok cev istih dimenzija.

Sastavljanje slojeva (cilindara) višeslojne cevi je delikatan zadatak i zahteva veliku preciznost izrade s obzirom na to da je ukupna veličina relativnog stezanja relativno mala ($\leq 0,002$). Tehnološki se izvodi na više načina, a najčešće zagrevanjem navlake (širenje na temperaturama 400—450°C), koja se posle postavljanja na osnovnu cev hladi i steže stvarajući čvrsti nedeljivi spoj.

U nekim slučajevima može se primeniti hlađenje osnovne cevi u tečnom azotu ili presovanje cilindra jedan u drugi bez zagrevanja ili hlađenja.

U svakom slučaju, za ovakve cevi glavni problem je određivanje optimalne vrednosti kontaktnih pritisaka i njima odgovarajućeg stezanja, uz uslov da se očuva potrebna elastična otpornost navlake i osnovne cevi.

jim su kontaktnim površinama: r_{i-1} , r_i , r_{i+1} , ..., r_{n-1} , u stanju mirovanja respektivno uspostavljeni kontaktni pritisci: p_{i-1} , p_i , p_{i+1} , ..., p_{n-1} i $p_n = 0$. Veličine kontaktnih pritisaka su, u stvari, statički spoljni pritisci ojačanja na kontaktnim površinama i njihova vrednost ne može biti veća od elastične otpornosti odgovarajućeg sloja višeslojne cevi.

Sl. 2 — Višeslojna cev (r_0 , r_n)

Normalna naprezanja u i-tom sloju u tangencijalnom σ_{τ_i} i radijalnom smeru σ_{r_i} ($\sigma_{z_i} = 0$), prema relacijama Laméa [2] u opštem slučaju glase:

$$\sigma_{\tau_i}(r) = \frac{p_{i-1}(r_i^2/r^2 + 1) - p_i(r_i^2/r_{i-1}^2 + r_i^2/r^2)}{r_i^2/r_{i-1}^2 - 1}, \quad r \in (r_{i-1}, r_i) \quad (1)$$

$$\sigma_{r_i}(r) = - \frac{p_{i-1}(r_i^2/r^2 - 1) + p_i(r_i^2/r_{i-1}^2 - r_i^2/r^2)}{r_i^2/r_{i-1}^2 - 1} \quad (2)$$

Sa stanovišta zahtevanih dimenzija, ukupne mase i čvrstoće cevi datog kalibra, važno je određivanje potrebnih veličina kontaktnih radijusa i stanja relevantnih naprezanja u slojevima cevi.

Za rešavanje navedenog problema u radu je, preko matematičkog modela, razrađen algoritam i dato programsko rešenje na PC računaru.

Stanje naprezanja višeslojne cevi oruđa

Neka se višeslojna cev (sl. 2) sa unutrašnjim radijusom r_0 i spoljašnjim radijusom r_n sastoji od n slojeva na či-

Prema teoriji najvećih relativnih deformacija, relativna deformacija na kontaktnim radijusima u tangencijalnom smeru je $\epsilon_{\tau_i} > \epsilon_{r_i}$ za sve slojeve osim na unutrašnjoj površini r_0 osnovne cevi i može se napisati u obliku:

$$\epsilon_{\tau_i} = \frac{\sigma_{\tau_i}(r) - \mu_i \sigma_{r_i}(r)}{E_i} \quad (3)$$

gde su:

μ_i , E_i — Poissonov koeficijent i modul elastičnosti i-tog sloja

Na ekstremnim radijusima i-tog sloja za $r = r_{i-1}$ i $r = r_i$, na osnovu prethodnih relacija, jednostavnom zamenom

za r mogu da se odrede veličine normalnih naprezanja i relativne tangencijalne deformacije. Na sličan način, vodeći računa o indeksima označenih slojeva ($i=1, 2, \dots, n$), mogu se odrediti odgovarajuća naprezanja i deformacije za svaki sloj i pripadajuće kontaktne površine. Pri tome se mora voditi računa o međusobnoj interakciji među slojevima s obzirom na postojanje kontaktnih pritisaka zbog preklapanja.

Ako je sastavljanje višeslojne cevi izvršeno serijskim navlačenjem slojeva (jedan po jedan), za određivanje veličina stezanja na kontaktnim površina-

ma među njima, u slučaju kontaktne površine $r=r_i$ važi:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\tau_i}(r_i) + \varepsilon_{\tau_{i+1}}(r_i) = \frac{\Delta_i}{2r_i}, \text{ odakle je stezanje na radijusu } r_i:$$

$$\Delta_i = 2r_i \varepsilon_i$$

S obzirom na relaciju (3), relativna tangencijalna deformacija na radijusu r_i , usled delovanja sloja r_{i+1} iznosi:

$$\varepsilon_{\tau_{i+1}}(r_i) = \frac{\sigma_{\tau_{i+1}}(r_i) - \mu_{i+1} \sigma_{r_{i+1}}(r_i)}{E_{i+1}} \quad (3)'$$

Analogno izrazima (1 i 2), ako je $r_{i+1} > r > r_i$, može se napisati:

$$\sigma_{\tau_{i+1}}(r) = \frac{p_i(r_{i+1}^2/r^2 + 1) - p_{i+1}(r_i^2/r_{i+1}^2 + r_{i+1}^2/r^2)}{r_{i+1}^2/r_i^2 - 1} \quad (4)$$

$$\sigma_{r_{i+1}}(r) = - \frac{p_i(r_{i+1}^2/r^2 - 1) + p_{i+1}(r_{i+1}^2/r_i^2 - r_{i+1}^2/r^2)}{r_{i+1}^2/r_i^2 - 1} \quad (5)$$

Uvrštavanjem $r=r_i$ u relacijama (1, 2, 4 i 5) posle sređivanja izraza dobija se:

$$\sigma_{\tau_i}(r_i) = \frac{2p_{i-1} - p_i(r_i^2/r_{i-1}^2 + 1)}{r_i^2/r_{i-1}^2 - 1}; \sigma_{r_i}(r_i) = -p_i$$

$$\sigma_{\tau_{i+1}}(r_i) = \frac{p_i(r_{i+1}^2/r_i^2 + 1) - 2p_{i-1}(r_{i+1}^2/r_i^2)}{r_{i+1}^2/r_i^2 - 1}; \sigma_{r_{i+1}}(r_i) = -p_i$$

Prema tome, stezanje Δ_i na kontaktnom radijusu r_i je:

$$\begin{aligned} \Delta_i = & \frac{2r_i}{E_i(r_i^2/r_{i-1}^2 - 1)} p_{i-1} + r_i \left[\frac{\mu_i}{E_i} + \right. \\ & + \frac{\mu_{i+1}}{E_{i+1}} + \frac{(r_{i+1}^2/r_i^2 + 1)}{E_{i+1}(r_{i+1}^2/r_i^2 - 1)} - \\ & \left. - \frac{(r_i^2/r_{i-1}^2 - 1)}{E_i(r_i^2/r_{i-1}^2 - 1)} \right] \cdot \\ & \cdot p_i - 2p_{i+1} \frac{(r_{i+1}^2/r_i^2)r_i}{E_{i+1}(r_{i+1}^2/r_i^2 - 1)} \end{aligned} \quad (6)$$

Radi pojednostavljenja, relaciju (6) možemo izraziti na pogodniji način u matričnom zapisu. Neka se članovi izraza uz pritiske izraze preko koeficijenta:

$$\begin{aligned} C_{1i} = & \frac{2r_i}{E_i(r_i^2/r_{i-1}^2 - 1)}; C_{2i} = r_i \left(\frac{\mu_i}{E_i} + \right. \\ & + \frac{\mu_{i+1}}{E_{i+1}} + \frac{(r_{i+1}^2/r_i^2 + 1)}{E_{i+1}(r_{i+1}^2/r_i^2 - 1)} - \\ & \left. - \frac{(r_i^2/r_{i-1}^2 + 1)}{E_i(r_i^2/r_{i-1}^2 - 1)} \right) \\ C_{3i} = & - \frac{2(r_{i+1}^2/r_i^2)r_i}{E_{i+1}(r_{i+1}^2/r_i^2 - 1)} \end{aligned}$$

Odatle je:

$$i = 1, 2, \dots, n = 1 \frac{\Delta_i = C_{1i} \cdot p_{i-1} + C_{2i} \cdot p_i + C_{3i} \cdot p_{i+1}}{\Delta_1 = C_{11} \cdot p_0 + C_{21} \cdot p_1 + C_{31} \cdot p_2}, \text{ odnosno za}$$

$$\Delta_2 = C_{12} \cdot p_1 + C_{22} \cdot p_2 + C_{32} \cdot p_3$$

$$\Delta_{n-1} = C_{1n-1} p_{n-2} + C_{2n-1} p_{n-1} + C_{3n-1} p_n$$

Ako se uvede pomoćna matrica prenosa [K], onda je:

Ako se višeslojna cev konačnih dimenzija (r_0, r_n) posmatra kao monoblok

$$\begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \vdots \\ \Delta_{n-1} \\ \Delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n-1} \\ & K_{21} & & \\ & \vdots & & \\ & & & K_{n-1} \\ & & & \dots & K_{n-1n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} \cdot p_1 + K_{1i} \cdot p_i + \dots + K_{1n-1} \cdot p_{n-1} \\ K_{21} \cdot p_1 + K_{2i} \cdot p_i + \dots + K_{2n-1} \cdot p_{n-1} \\ \vdots \\ K_{n-11} p_1 + K_{n-1i} \cdot p_i + \dots + K_{n-1n-1} \cdot p_{n-1} \end{bmatrix}$$

Izjednačavanjem članova uz odgovarajuće pritiske:

$C_{11}p_0 + C_{21}p_1 + C_{31}p_2 = K_{11}p_1 + \dots + K_{1n-1}p_{n-1}$, itd., dobijaju se članovi matrice [K]; $K_{11}=C_{21}$; $K_{12}=C_{31}$; $K_{13}=K_{14}=\dots=K_{nn-1}=0$

$$K_{i1}=0; K_{i2}=0; K_{ii-1}=C_{1i}; K_{ii}=C_{2i}; K_{ii+1}=C_{3i} \dots \text{itd.}$$

Konačno se sređivanjem članova matrice (svi detalji su definisani u programu za proračun pomoću PC računara) dobija vektorska jednačina oblika (»opšta jednačina stezanja«):

$$[\Delta] = [K] [p], \text{ gde su:}$$

[Δ] — vektor stezanja na kontaktnom radijusu višeslojne cevi,

[p] — vektor kontaktnih pritisaka na kontaktnim površinama slojeva cevi.

Nalaženjem inverzne matrice $[K]^{-1}$ (pomoću potprograma za inverznu matricu) i množenjem sa vektorom [Δ] (potprogram za množenje matrica), mogu se dobiti vrednosti vektora [p], tj. $[p] = [K]^{-1} [\Delta]$, odnosno odgovarajući kontaktni pritisci.

Na osnovu poznatih kontaktnih pritisaka preko relacija (4, 5) mogu se odrediti veličine naprezanja u svakoj tački date višeslojne cevi u stanju mirovanja (statička prednaprezanja).

cev opterećena unutrašnjim pritiskom p_0 (pritisak opaljenja, spoljni pritisak $p_n=0$), pomoću relacija Lamea mogu se u svakoj tački zida cevi odrediti vrednosti pritisaka, odnosno naprezanja i zvanih opaljenjem.

Sumiranjem pritisaka i tangencijalnih naprezanja (statičkih i usled opaljenja) za istu tačku sloja cevi, konačno se dobijaju ukupna ili rezultujuća naprezanja.

Na ovaj način bi stanje naprezanja višeslojne cevi bilo u potpunosti određeno. Ako se, međutim, sastavljanje (ojačavanje) višeslojne cevi izvodi sa optimalnim odnosom radijusa, postavlja se pitanje odgovarajućih kontaktnih pritisaka i veličina stezanja na kontaktnim radijusima.

Optimalne vrednosti radijusa i stezanja višeslojne cevi

Za optimalno sastavljanje višeslojne cevi važi uslov da je maksimalna elastična otpornost višeslojne cevi jednaka zbiru individualnih otpornosti svakog od njenih n slojeva. Na osnovu toga se izvodi relacija za Gadalinov broj [2], kojim se uspostavlja odgovarajuća međuzavisnost između radijusa svih slojeva višeslojne cevi.

Ako su poznati ili zadani ekstremni radijusi višeslojne cevi (r_1 i r_{n+1}) sa različitim brojem slojeva n i od istog materijala (σ_e), onda se za optimalne radijuse dobija opšti izraz u obliku:

$$r_{i+1} = r_i \left(\frac{r_{n+1}}{r_1} \right)^{1/n}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Elastična otpornost optimalno sastavljene višeslojne cevi i kontaktni pritisci, koje slojevi mogu da izdrže u domenu elastičnih deformacija, određuju se iz uslova da vrednosti ekvivalentnih naprezanja na unutrašnjim površinama slojeva budu jednaki granici elastičnosti σ_{ei} za materijal datog sloja.

Kako je:

$$\sigma_{\tau_i}(r) = \frac{p_i(r_{i+1}^2/r^2 + 1) - p_{i+1}(r_{i+1}^2/r_i^2 + r_{i+1}^2/r^2)}{r_{i+1}^2/r_i^2 - 1}$$

$$\sigma_{r_i}(r) = - \frac{p_i(r_{i+1}^2/r^2 - 1) + p_{i+1}(r_{i+1}^2/r_i^2 - r_{i+1}^2/r^2)}{r_{i+1}^2/r_i^2 - 1}$$

prema uslovu za ekvivalentna naprezanja na radijusu $r=r_{i+1}$ i-tog sloja je:

$$E_i \varepsilon_i = \sigma_{\tau_i}(r_{i+1}) - \mu_i \sigma_{r_i}(r_{i+1}) \leq \sigma_{ei}$$

Posle uvrštavanja izraza za $\sigma_{\tau_i}(r=r_{i+1})$ i $\sigma_{r_i}(r=r_{i+1})$ i sređivanja dobija se:

$$\sigma_{ei} = \left(\frac{2}{r_{i+1}^2/r_i^2 - 1} \right) p_i + \left(\mu_i - \frac{r_{i+1}^2/r_i^2 + 1}{r_{i+1}^2/r_i^2 - 1} \right) p_{i+1} \quad (8)$$

Ako u relaciji (8) članove u zagradama uz pritiske označimo sa koeficijentima C_{i2} i C_{i3} , onda se relacija (8) jednostavnije može napisati u obliku:

$$\sigma_{ei} = C_{i2} p_i + C_{i3} p_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\begin{aligned} \sigma_{e1} &= C_{12} p_1 + C_{13} p_2 \\ \sigma_{e2} &= C_{22} p_2 + C_{23} p_3 \\ &\vdots \\ \sigma_{en} &= C_{n2} p_n + C_{n3} p_{n+1} \end{aligned}$$

Daljim sređivanjem relacija u matricnom obliku, uvođenjem matrice $[K]$, slično prethodnom slučaju, sledi:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{e1} \\ \sigma_{e2} \\ \vdots \\ \sigma_{ei} \\ \vdots \\ \sigma_{en} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{i1} & K_{i2} & \dots & K_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_i \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix}$$

U vektorskoj jednačini: $[\sigma_e] = [K][p]$, elementi matrice $[K]$ određeni su na isti način kao u slučaju stezanja $[\Delta]$ na kontaktnim radijusima.

Konačno se vektor pritiska $[p]$, koji slojevi mogu da izdrže respektivno,

dobija nalaženjem inverzne matrice $[K]^{-1}$, odnosno preko relacije:

$$[p] = [K]^{-1} [\sigma_e]$$

Pri tome pritisak p_1 , u stvari, predstavlja elastičnu otpornost date višeslojne cevi. Kada se znaju optimalni

kontaktni pritisci, onda se jednostavno u svakom sloju višeslojne cevi mogu odrediti odgovarajuća naprezanja.

Ako bi u kanalu višeslojne cevi (shvaćene kao monoblok istih dimenzija) delovao pritisak p_1 jednak njenoj elastičnoj otpornosti (ekstremni slučaj), onda se primenom relacija Laméa može odrediti kolike kontaktne pritiske bi on izazvao na kontaktnim radijusima. Označimo ih sa p_{ei} .

Konačno se za statičke pritiske na kontaktnim radijusima izazvanih optimalnim stezanjem, primenom metode superpozicije, dobija:

$$p_{ki} = p_i - p_{ei} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\tau i}(r=r_{i+1}) = \left(\frac{1-\mu_i}{E_i} \right) \frac{p_i \left(\frac{1+\mu_i}{1-\mu_i} + 1 \right) - p_{i+1} \left(\frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} + \frac{1+\mu_i}{1-\mu_i} \right)}{r_{i+1}^2/r_i^2 - 1} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\tau_{i+1}}(r=r_{i+1}) = \left(\frac{1-\mu_i}{E_{i+1}} \right)$$

$$\frac{p_{i+1} \left(\frac{1+\mu_{i+1}}{1-\mu_{i+1}} \frac{r_{i+2}^2}{r_{i+1}^2} + 1 \right) - p_{i+2} \left(\frac{r_{i+2}^2}{r_{i+1}^2} + \frac{1+\mu_{i+1}}{1-\mu_{i+1}} \frac{r_{i+2}^2}{r_{i+1}^2} \right)}{r_{i+2}^2/r_{i+1}^2 - 1} \quad (12)$$

Pri tome se za p_i uzima p_{ki} , a za r_i optimalni radijus stezanja. Na ovaj način potpuno su definisane optimalne vrednosti radijusa i stezanja višeslojne cevi, odnosno odgovarajući kontaktni pritisci među slojevima cevi.

Primer proračuna

Za numeričko rešavanje potrebnih veličina višeslojne cevi prema iznetom matematičkom modelu, izrađeno je kompletno programsko rešenje na PC računaru. Programsko rešenje u FORTRANU sadrži glavni program »MULCEV« i odgovarajuće potprograme za proračun u matričnom obliku. Kompletno programsko rešenje detaljnije je objašnjeno u [3].

Rezultati proračuna prikazani su na primeru dvoslojne cevi kalibra 158 mm.

Ukupno dozvoljeno optimalno stezanje u radijalnom pravcu na i -tom kontaktnom radijusu biće:

$$\Delta_i = r_i (|\varepsilon_{\tau i}(r=r_{i+1})| + |\varepsilon_{\tau_{i+1}}(r=r_{i+1})|) \quad (10),$$

gde su na osnovu relacija za ekvivalentna naprezanja cevi, ε_{τ} — relativne tangencijalne deformacije:

Polazni podaci za proračun prikazani su u tabeli 1.

Rezultati proračunatih veličina dvoslojne cevi prikazani su u tabeli 2 i na sl. 3.

Sl. 3 — Dijagram naprezanja

Tabela 1.

Broj slojeva cevi	Unutrašnji radijus r_1 , (mm)	Spoljašnji radijus r_3 , (mm)	Granica elastičnosti σ_e , (MPa)	Modul elastičnosti E , (GPa)	Poissonov koeficijent μ	Pritisak opaljenja p_1 , (MPa)
2	79,0	132,5	900,0	216,0	0,33	320,8

Tabela 2.

Radijus r , (mm)	Stanje naprezanja						Opti- malni radijus r_{2opt} (mm)	Opti- malno apsolut- no ste- zanje Δ_2 (mm)	Elasti- čna ot- pornost cevi p_{gr} , (MPa)
	tangencijalno, (MPa)			radijalno, (MPa)					
	$\sigma_{\tau p}$	$\sigma_{\tau o}$	σ_{τ}	$\sigma_{r p}$	$\sigma_{r o}$	σ_{ϵ}			
79,0	674,67	—202,71	471,96	—320,80	0,00	—320,80	102,31	0,1532	452,62
81,3	646,56	—196,98	449,58	—292,68	—5,72	—298,41			
83,6	620,77	—191,73	429,04	—266,89	—10,97	—277,87			
85,9	597,04	—186,90	410,14	—243,16	—15,80	—258,97			
88,3	575,17	—182,44	392,72	—221,29	—20,26	—241,55			
90,6	554,96	—178,33	376,63	—201,08	—24,37	—225,46			
92,9	536,25	—174,52	361,73	—182,37	—28,18	—210,56			
95,3	518,90	—170,99	347,91	—165,02	—31,72	—196,74			
97,6	502,77	—167,70	335,07	—148,89	—35,00	—183,89			
99,9	487,76	—164,64	323,11	—133,88	—38,06	—171,94			
102,3	473,76	—161,79	311,96	—119,88	—40,91	—160,80			
102,3	473,76	161,67	635,44	—119,88	—40,91	—160,80			
105,3	456,98	155,94	612,93	—103,10	—35,18	—138,29			
108,3	441,59	150,69	592,28	—87,71	—29,93	—117,64			
111,3	427,43	145,86	573,29	—73,55	—25,10	—98,65			
114,3	414,38	141,40	555,78	—60,50	—20,64	—81,14			
117,4	402,32	137,29	539,61	—48,44	—16,53	—64,97			
120,4	391,15	133,48	524,64	—37,28	—12,72	—50,00			
123,4	380,80	129,94	510,75	—26,92	—9,18	—36,11			
126,4	371,18	126,66	497,85	—17,30	—5,90	—23,21			
129,4	362,22	123,61	485,83	—8,35	—2,84	—11,19			
132,5	353,87	120,76	474,63	0,00	0,00	0,00			
$\sigma_{\tau p}$, $\sigma_{r p}$ — naprezanja usled pritiska opaljenja $\sigma_{\tau o}$, $\sigma_{r o}$ — naprezanje usled stezanja (statička)									

Zaključak

Dobijeni proračunski rezultati traženih veličina dvoslojne cevi su korektni i u potpunoj saglasnosti sa podacima iz literature.

Programsko rešenje omogućuje više mogućnosti proračuna potrebnih veličina višeslojne cevi. Za zadane konačne dimenzije cevi omogućuje određivanje optimalnih radijusa, veličina optimalnog relativnog i apsolutnog stezanja na kontaktnim radijusima, kao i stanje naprezanja u slojevima cevi. Navedene veličine mogu se odrediti i u

slučaju ako su na pojedinim slojevima već definisana apsolutna ili relativna stezanja. Na ovaj način prilično dugotrajni postupak proračuna se relativno brzo izvodi i omogućuje u procesu projektovanja višeslojnih cevi procenu i izbor najpovoljnije varijante s obzirom na karakteristike materijala, čvrstoću cevi, i sl.

Naravno, programski model ne prejudicira konačno rešenje ukupne problematike višeslojnih cevi, posebno u domenu tehnoloških zahteva: izrade navlaka, tolerancija preklopa, stanja kontaktnih površina, lokalnog odstupanja

nja kontaktnog radijusa od nazivne mere, i dr. U svakom slučaju, prikazanim modelom rešavaju se najvažnija pita-

nja problematike višeslojnih cevi, uz istovremenu mogućnost njegove dalje nadgradnje.

Literatura:

- [1] B. Orlov, K. Larman: Ustrojstvo i projektovanje stvolov artiljerijskih orudij, Moskva, Mašinstroenie, 1976.
- [2] K. Larman: Projektovanje i proizvodstvo artiljerijskih sistem, čast 1 Voenoe izdatelstvo, Moskva, 1946.
- [3] M. Davidović: Seminarski rad, VTA UVJ Beograd, 1992.
- [4] R. Obrenović: Konstrukcija artiljerijskih oruđa I, Zagreb TŠC, 1975.
- [5] Z. Ristić: Odabrana poglavlja iz artiljerijskih oruđa, CVTŠ Zagreb, 1990.
- [6] M. Kalezić: Projektovanje cevi artiljerijskog oruđa, VTI Beograd, 1985.