Mr Zoran Ristić,
potpukovnik, dipl. inž.

Milislav Jakovljević,
potpukovnik, dipl. inž.

UTICAJ TEMPERATURNIH NAPREZANJA NA UKUPNA NAPREZANJA CEVI ORUĐA

Na osnovu proračuna naprezanja cevi oruđa pod dejstvom pritiska i temperature, u radu je izvršena analiza uticaja temperaturnog naprezanja u odnosu na ukupno stanje naprezanja.

Razmatraju se različite debljine zida cevi i nekoliko karakterističnih vrednosti pritiska opaljenja i temperature. Određuju se dominantna naprezanja merodavna za proračun čvrstoće cevi i daju sugestije za praktično rešavanje problema.

Uvod

Razmatranje pitanja vezanih za problem opterećenja cevi oruđa za vreme opaljenja usled pritiska i temperature, a posebno odgovarajućih naprezanja, od posebne važnosti, kako u teorijskom, tako i praktičnom pogledu. Oba opterećenja, pa prema tome i veličine naprezanja, mogu predstavljati ozbiljno ograničenje pri daljem povećavanju moći oruđa.

Iako su u široj literaturi [1], [2], [3] poznata rešenja za određivanje stanja naprezanja u zidu cevi oruđa, za proračun čvrstoće cevi, po pravilu, uzimaju se samo naprezanja usled pritiska, a zanemaruju temperaturna naprezanja.

Provedena analiza u ovom radu treba da pokaže kako se i pod kojim uslovima veličine temperaturnih naprezanja mogu zanemariti u odnosu na naprezanja usled pritiska, odnosno kada ova aproksimacija nije korektna. Analiza je izvršena na primeru cevi oruđa sa relativnom debljinom zida cevi $n_i = r_2/r_1$ u granicama $r_2 = \sqrt{2-2,4}r_1$. Cev je opterećena pritiscima opaljenja $p_i = 250, 350$ i 500 MPa i temperaturama $\Delta T_i = 100, 200$ i 300 K ($\Delta T_i = T_1 - T_2$, temperaturna razlika između unutrašnjeg i spoljašnjeg zida cevi).

Rezultati stanja naprezanja, ukupno naprezanje usled pritiska i temperature, kao i njihov međusobni odnos,

zbog obimnosti podataka prikazani su samo na ekstremnim radijusima cevi tabelarno i grafički.

Obrada rezultata izvršena je pomoću PC računara primenom programskog paketa MATCAD.

Primena modela za proračun stanja naprezanja cevi

Proračun stanja naprezanja u slojevima cevi oruđa usled pritiska opaljenja (p_i) izvršen je na osnovu poznatih relacija Laméa, prema [1]. Ako se za odnos ekstremnih radijusa cevi (r_2/r_1) uvede oznaka: $a_{2i} = r_2/r_1$, odnosno $a_{2ri} = r_2/r_1$ za radijus i -tog sloja, gde je:

$$r_i = r_1 + (r_2 - r_1) \frac{i-1}{m-1}$$

$i = 1, 2, \dots, m$ onda se relacije za naprezanja u tangencijalnom smeru σ_t^p , radijalnom smeru σ_r^p i aksijalnom smeru σ_z^p mogu napisati u sledećem obliku:

$$\sigma_{ti}^p = p \cdot \frac{a_{2ri}^2 + 1}{a_{2i}^2 - 1} \quad (1)$$

$$\sigma_{ri}^p = -p \frac{a_{2ri}^2 - 1}{a_{2i}^2 - 1} \quad (2)$$

$$\sigma_z^p = \frac{p}{a_{2i}^2 - 1} = \text{konst.} \quad (3)$$

Zadržavajući uvedene oznake za radijuse cevi, na osnovu [1], relacije za naprezanja usled temperature ΔT u tangencijalnom smeru σ_t^T , radijalnom smeru σ_r^T i aksijalnom smeru σ_z^T , mogu se napisati u sledećem obliku:

$$\sigma_{ti}^T = \frac{\Delta T \alpha E}{2(1-\mu)} \cdot \frac{1 - 1n(a_{2ri})}{1n(a_{2i})} - \frac{r_i^2(r_2^2 - r_i^2)}{r_i^2(r_2^2 - r_i^2)} \quad (4)$$

$$\sigma_{ri}^T = \frac{\Delta T \alpha E}{2(1-\mu)} \cdot \frac{r_i^2(r_2^2 - r_i^2)}{r_i^2(r_2^2 - r_i^2)} - \frac{1n(a_{2ri})}{1n(a_{2i})} \quad (5)$$

$$\sigma_{zi}^T = \frac{\Delta T \alpha E}{2(1-\mu)} \cdot \frac{1 - 21n(a_{2ri})}{1na_{2i}} - \frac{2r_i^2}{(r_2^2 - r_i^2)} \quad (6)$$

gde su:

$\mu = 0,3$ Poissonov koeficijent za materijal cevi;

$\alpha = 12 \cdot 10^{-6}, 1/^\circ\text{C}$ — koeficijent toplinske vodljivosti;

$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ — modul elastičnosti.

Ukupno naprezanje usled pritiska i temperature na osnovu navedenih relacija predstavlja se u obliku:

$$\sigma_{tui} = \sigma_{ti}^p + \sigma_{ti}^T \quad (7)$$

$$\sigma_{rui} = \sigma_{ri}^p + \sigma_{ri}^T \quad (8)$$

$$\sigma_{zui} = \sigma_z^p + \sigma_{zi}^T \quad (9)$$

a, relativni odnos odgovarajućih naprezanja u obliku:

$$\frac{\sigma_{ti}^T}{\sigma_{ti}^p}, \frac{\sigma_{ri}^T}{\sigma_{ri}^p} \text{ i } \frac{\sigma_{zi}^T}{\sigma_z^p} \quad (10)$$

Proračun stanja naprezanja prema datom modelu izveden je na primeru cevi oruđa $d=122 \text{ mm}$ ($r_i=61 \text{ mm}$). Razmatrane su varijante opterećenja cevi usled pritiska: $p_i=250, 350$ i 500 MPa i temperature $\Delta T_i=100, 200$ i 300 K u različitim presecima cevi. Relativna debljina karakterističnog preseka cevi (za max. pritisak $n_i=r_2/r_i$ uzima se u granicama $n_i=(1,4; 1,6 \text{ do } 2,4)$), a stanje naprezanja se računa u deset tačaka po slojevima cevi.

Rezultati proračuna i analiza

Da bi se dobila pouzdana ocena o značaju pojedinih naprezanja i njihov uticaj na ukupno stanje naprezanja, izvedeni su proračunski rezultati u dve varijante.

Prva varijanta obuhvata rezultate stanja naprezanja za karakteristične preseke (n_i), pritisak opaljenja $p_i=250 \text{ MPa}$ i temperaturu $\Delta T_i=300 \text{ K}$, prema tabeli 1. Zbog obimnosti podataka rezultati se daju samo za ekstremne radijuse.

Uticaj debljine preseka cevi na nivo odgovarajućeg stanja tangencijalnog naprezanja od pritiska σ_t^p i temperature σ_t^T , odnosno ukupno naprezanje σ_t^u , prikazan je na sl. 1 i sl. 2.

Dobijeni rezultati i grafički prikaz ukazuju na sledeće činjenice:

— za dato opterećenje cevi usled pritiska, tangencijalna naprezanja σ_{ti}^p su dominantna naprezanja u odnosu na radijalna σ_{ri}^p i aksijalna naprezanja σ_{zi}^p ;

— usled temperature, σ_{ti}^T je različitog predznaka na unutrašnjem i spoljašnjem radijusu cevi. Sa povećavanjem debljine zida cevi, ono u apsolutnom iznosu na unutrašnjem sloju raste, a na spoljašnjem pada;

— za »tankostene cevi« ($n_1=1,4$ i $n_2=1,6$), ukupno naprezanje σ_t^u je veće od pojedinačnog naprezanja usled pritiska i temperature, tj. $\sigma_t^u > \sigma_t^p$ i $\sigma_t^u > \sigma_t^T$;

— za cevi sa većom debljinom zida $n_3 \geq 1,8$, ukupno naprezanje σ_t^u je manje od naprezanja usled pritiska na unutrašnjem sloju, tj. $\sigma_t^u < \sigma_{ti}^p$;

— aksijalna naprezanja σ_{zi}^T po apsolutnom iznosu usled temperature su veća u odnosu na ista usled pritiska i rastu sa povećanjem temperature cevi. Mnogo su veća od radijalnih naprezanja usled temperature, tj. $\sigma_{zi}^T > \sigma_{ri}^T$, pa se u proračunima ne mogu zanemariti za razliku od σ_{ri}^T .

Druga varijanta proračuna obuhvata rezultate stanja naprezanja izve-

Optere- ćenje	Relativna debljina cevi	Naprezanje					
		σ_{ti} , MPa		σ_{ri} , MPa		σ_{zi} , MPa	
		r_1	r_2	r_1	r_2	r_1	r_2
$p_i = 250$ MPa	1,4	770,8	520,8	—250,0	0	260,4	260,4
	1,6	570,5	320,5	—250,0	0	160,3	160,3
	1,8	473,2	223,2	—250,0	0	111,6	111,6
	2,0	416,7	166,7	—250,0	0	83,3	83,3
	2,2	380,2	130,2	—250,0	0	65,1	65,1
	2,4	355,0	105,0	—250,0	0	52,5	52,5
$T_i = 300$ K	1,4	524,9	1605,0	0	0	—600,1	479,9
	1,6	68,9	1149,0	0	0	—623,4	456,6
	1,8	—161,3	918,7	0	0	—643,4	436,6
	2,0	—300,9	779,0	0	0	—660,9	419,0
	2,2	—395,1	684,9	0	0	—676,4	403,6
	2,4	—463,2	616,8	0	0	—690,1	389,9
Ukupno naprezanje $\sigma_{ti}^u, \sigma_{ri}^u, \sigma_{zi}^u$, MPa	1,4	1295,7	2125,8	—250,0	0	—339,7	740,3
	1,6	639,4	1469,5	—250,0	0	—463,1	617,9
	1,8	311,9	1141,9	—250,0	0	—531,8	548,2
	2,0	115,7	945,7	—250,0	0	—577,6	502,4
	2,2	—14,9	815,1	—250,0	0	—611,3	468,7
	2,4	—108,2	721,8	—250,0	0	—637,6	442,4

Sl. 1 — Tangencijalno naprezanje na radiju-
su r_1 Sl. 2 — Tangencijalno naprezanje na radiju-
su r_2

Tabela 2

Opterećenje			Naprezanje						
			σ_{ti}, MPa		σ_{ri}, MPa		σ_{zi}, MPa		
			$r_1=61$	$r_2=122$	$r_1=61$	$r_2=122$	$r_1=61$	$r_2=122$	
$\Delta T_i, \text{K}$	100		—100,3	259,7	0	0	—220,3	139,7	
	200		—200,6	519,4	0	0	—440,6	279,4	
	300		—300,9	779,0	0	0	—660,9	419,0	
P_i, MPa	250		416,7	166,7	—250	0	83,3	83,3	
	350		583,3	233,3	—350	0	116,7	116,7	
	500		833,3	333,3	—500	0	166,7	166,7	
Ukupno naprezanje $\sigma^u = \sigma_T + \sigma_P, \text{MPa}$	$\Delta T_1 = 100$	p_1	250	316,4	426,4	—250	0	—137,0	223,0
		p_2	350	483,0	493,0	—350	0	—103,6	256,4
		p_3	500	733,0	593,0	—500	0	—53,6	306,4
	$\Delta T_2 = 200$	p_1	250	216,0	686,0	—250	0	—357,3	362,7
		p_2	350	382,7	752,7	—350	0	—324,0	396,0
		p_3	500	632,7	852,7	—500	0	—274,0	446,0
	$\Delta T_3 = 300$	p_1	250	115,7	945,7	—250	0	—577,6	502,4
		p_2	350	282,4	1012,0	—350	0	—544,3	535,7
		p_3	500	532,4	1112,0	—500	0	—494,3	585,7
Odnos naprezanja σ_T/σ_P	$\Delta T_1 = 100$	p_1	250	—0,24	1,56	0	0	—2,64	1,68
		p_2	350	—0,17	1,11	0	0	—1,89	1,20
		p_3	500	—0,12	0,78	0	0	—1,32	0,84
	$\Delta T_2 = 200$	p_1	250	—0,48	3,12	0	0	—5,29	3,35
		p_2	350	—0,34	2,23	0	0	—3,78	2,40
		p_3	500	—0,24	1,56	0	0	—2,64	1,68
	$\Delta T_3 = 300$	p_1	250	—0,72	4,67	0	0	—7,93	5,03
		p_2	350	—0,52	3,34	0	0	—5,66	3,59
		p_3	500	—0,36	2,34	0	0	—3,97	2,51

denih za tri veličine pritiska i temperature u granicama ekstremnih vrednosti u jednom od preseka cevi ($n=2,0$), prema tabeli 2. Za date kombinacije mogućih opterećenja cevi proračunate su i vrednosti odnosa odgovarajućih stanja naprezanja na ekstremnim radijusima (σ^T/σ^p).

Kvalitativni tok promene odgovarajućih naprezanja za karakteristični presek cevi, kao i ukupnog naprezanja prikazan je na sl. 3, 4 i 5. On je u potpunoj saglasnosti sa poznatim rešenjima u literaturi, kada se radi o debelostenim cevima.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti sledeće:

Sl. 3 — Naprezanje usled pritiska

Sl. 4 — Naprezanje usled temperature

— za velike pritiske (p_3) i temperaturne razlike (ΔT_3) tangencijalno naprezanje na unutrašnjem sloju se smanjuje, a na spoljašnjem povećava. Ukupna naprezanja su pri tome manja od naprezanja usled pritiska na radijusu r_1 i obratno na radijusu r_2 ;

— za sve vrednosti pritiska (p_i) i temperaturne razlike (ΔT_i), ukupna naprezanja na unutrašnjem sloju u tangencijalnom smeru manja su od naprezanja usled pritiska, a veća od naprezanja usled temperature, tj. $\sigma^u_t < < \sigma^p_t \text{ i } \sigma^u_t > / \sigma^T_t /$.

Ukupna naprezanja u aksijalnom smeru manja su od naprezanja usled temperature, a veća od naprezanja us-

led pritiska tj. $\sigma_z^u < \sigma_z^T$ i $|\sigma_z^u| > |\sigma_z^P|$, osim za male temperaturne razlike (ΔT_i) i pritiske p_2 i p_3 na unutrašnjem radijusu cevi;

— za sve vrednosti pritiska (p_i) i temperaturne razlike (ΔT_i), ukupna naprezanja na spoljašnjem radijusu cevi u tangencijalnom i aksijalnom smeru su najveća i veća su od odgovarajućih pojedinačnih naprezanja usled

pritiska i temperature, tj.: $\sigma_t^u > \sigma_t^P$, σ_t^T i $\sigma_z^u > \sigma_z^P$, σ_z^T ;

— za sve vrednosti pritiska (p_i) i temperaturne razlike (ΔT_i), tangencijalna naprezanja usled pritiska po apsolutnoj vrednosti veća su od temperaturnih naprezanja na unutrašnjem radijusu cevi $|\sigma_t^P| > |\sigma_t^T|$, dok je na spoljašnjem radijusu obratno, tj.: $|\sigma_t^P| < |\sigma_t^T|$;

— za velike temperaturne razlike (ΔT_i) i male pritiske (p_i), ukupna naprezanja u radijalnom smeru su najmanja u odnosu na ista naprezanja u tangencijalnom i aksijalnom smeru. tj.: $|\sigma_r^u| < |\sigma_t^u|$, $|\sigma_r^u| < |\sigma_z^u|$.

Zaključak

Uz navedeni komentar dobijenih rezultata stanja naprezanja u cevi za date varijante opterećenja (P_i , ΔT_i) može se zaključiti sledeće:

— razlika između ukupnog naprezanja u spoljašnjem i unutrašnjem sloju cevi je veća što su vrednosti pritiska i temperaturne razlike veće;

— za manje vrednosti pritiska barutnih gasova, a veće temperaturne razlike, ukupno maksimalno naprezanje veće je od naprezanja usled pritiska, odnosno temperature;

— kao što se pri opterećenju cevi usled pritiska aksijalna naprezanja u odnosu na tangencijalna i radijalna mogu zanemariti, to isto važi i za radijalna naprezanja, ali samo u slučaju opterećenja cevi temperaturom;

— u procesu opaljenja, stanje naprezanja zagrejane cevi je takvo da ona poprima odlike »autofretovane« cevi, tj. ukupno tangencijalno naprezanje se na unutrašnjem sloju smanjuje, a na spoljašnjem povećava.

Sl. 5 — Ukupna naprezanja

S obzirom na to da proces opaljenja neminovno prate velika promena pritiska i temperature koji se menjaju zavisno od vrste, količine barutnog punjenja, kao i režima vatre, u fazi proračuna i dimenzionisanja cevi svakako se moraju računati odgovarajuća naprezanja usled pritiska i temperature,

a zatim odrediti ukupno stanje naprezanja.

Za merodavnu vrednost naprezanja treba usvojiti dominantna naprezanja, kako je prethodno istaknuto, da ne bi došlo do smanjenja potrebne čvrstoće cevi.

Literatura:

[1] B. Orlov, K. Larman: Ustrojstvo i projektovanje stvolov artiljerijskih orudij, Mašinostroenie 1976, Moskva.

[2] S. Bojršinov: Osnovni stroitel'noj mehaniki mašin, Mašinostroenie 1973, Moskva.

[3] D. Regodić: Magistarski rad, MF Beograd, 1988.