

DOPŘEDNÉ PROTlačOVÁNÍ

Dopředné protlačování se nejčastěji používá zejména při výrobě tvarových součástí z tyčového profilového nebo válcového polotovaru. Dopředné protlačování kovu bylo nejdříve využíváno v hutním průmyslu při výrobě tyčí, profilů a trubek. Strojírenské protlačování se liší od hutního zejména v těchto zásadních bodech:

- 1) Vzdálenost čela průtlačníku a dna průtlačnice na konci zdvihu je určena rozměrem silnější části průtlačku ne minimální tloušťkou dna zůstatkového polotovaru.
- 2) Délku stopky průtlačku určuje jeho konstrukce, ale současně je tato délka omezena parametry lisu.
- 3) Průtlaček se od nástroje oddělí stíráním nebo vyrážením při zpětném zdvihu lisu a neodděluje se od zbytku polotovaru jako u hutního protlačování tyčí.

Technologické parametry dle ČSN 22 7005:

V ČSN 22 7005 »Protlačování ocelí za studena« jsou mimo jiné stanoveny formální postupy určování technologických parametrů dopředného protlačování. Jde zejména o deformaci, protlačovací tlak a sílu atd. Dle rozměrů na obr. 1 lze určit deformaci průřezovou a podélnou pro *plný* průtlaček:

$$\varphi_S = \ln(S_0/S_1) = \ln(D/d)^2, \quad \varphi_L = \ln(L_0/L), \quad (1)$$

kde L_0 označuje výchozí délku polotovaru.

Protlačovací tlak určíme z rovnice:

$$\sigma_{ds} = \sigma_p(\varphi_S + 0,6) \cdot \left(1,25 + 2 \cdot f \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot L_0}{S_0}} \right), \quad (2)$$

kde σ_p určíme z rovnice z modelu zpevnění, jehož určujícím parametrem průřezová deformace.

Podobně pro rotační *duté* průtlačky získáme vztahy pro výpočet deformace průřezové a podélné:

$$\varphi_S = \ln\left[\frac{(D^2 - d_2^2)}{(d^2 - d_2^2)}\right], \quad \varphi_L = \ln(L_0/L), \quad (3)$$

kde d_2^2 je vnitřní průměr dutiny průtlačku, a *protlačovacího tlaku*:

$$\sigma_{ds} = \sigma_p(\varphi_S + 0,6) \cdot \left[1,25 + \frac{\pi \cdot (D + d)}{f \cdot L_0 S_0} \right]. \quad (4)$$

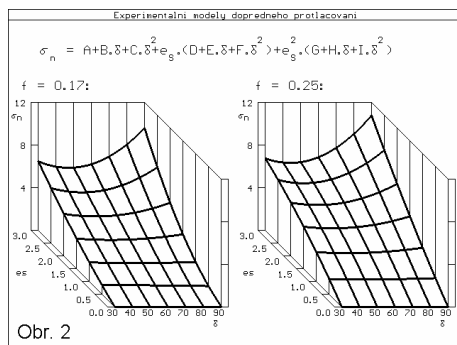
Protlačovací síla je pak v obou případech dána vztahem:

$$F_d = \sigma_{ds} \cdot S_0, \quad (5)$$

kde S_0 je plocha průřezu činné části průtlačníku. Přetvárná práce protlačování se stanoví z rovnice:

$$A_t = F_d \cdot \Delta L, \text{ kde } \Delta L \text{ je dráha průtlačníku, během níž probíhá vlastní protlačování.} \quad (6)$$

Model dopředného protlačování:



Obr. 2

Spočívá ve stanovení plochy poměrných napětí v závislosti na průřezové deformaci a redukčním úhlu. Experimenty proběhly v rozsahu $\varphi_S = 0,1 \div 3$ a

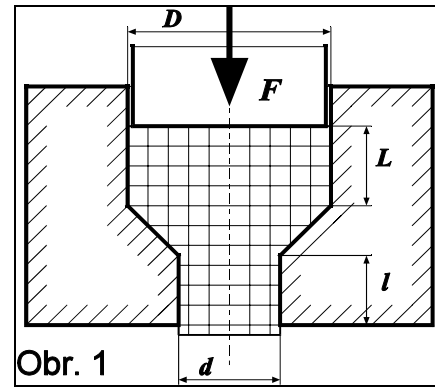
$\gamma = 30^\circ \div 90^\circ$. Koefficienty rovnice (7) jsou v tabulce 1 a tvar plochy na obr. 2. Jestliže porovnáme průběhy přetvárných odporů s doporučením ČSN 22 7005 na obr. 3, je patrná značná shoda. Obecná rovnice

$$\text{regresní plochy: } \sigma_n = A + B \cdot \gamma + C \cdot \gamma^2 + \varphi_S(D + E \cdot \gamma + F \cdot \gamma^2) + \varphi_S^2(G + H \cdot \gamma + I \cdot \gamma^2). \quad (7)$$

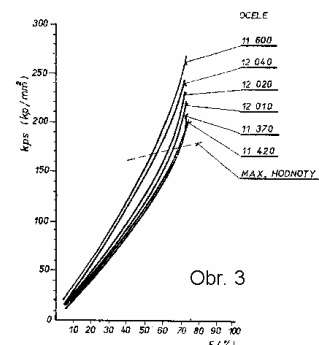
Tab. 1

f	A	B	C	D	E	F	G	H	I
0,17	0,03706	-0,00247	0,00003	1,11645	0,02489	-0,00029	0,78498	-0,02956	0,00032
0,17	-0,03982	0,00186	-0,00002	3,24420	-0,01079	0,00009	0,08380	-0,01737	0,00021

Materiál pro protlačování: Pro protlačování je nejvhodnější materiál ve stavu žíhaném na měkko, struktura u ocelí feritickoperlitická a perlitem pokud možno globulárním, průměrná velikost zrna 5 až 8 dle ČSN 42 0463. Doporučené mechanické vlastnosti: co nejnižší mez kluzu, co nejvyšší tažnost, co nejvyšší kontrakce (min.



Obr. 1



Obr. 3

55%), poměr $R_e/R_m \in \langle 0,5; 0,6 \rangle$. Chemické složení ocelí: nízký obsah uhlíku, co nejnížší obsah fosforu a síry, min. výskyt vtaženin a vycezenin, nízký obsah nekovových vměstků. Cílem povrchové úpravy polotovarů před protlačováním je vytvoření co nejprůzračnějších podmínek tření \Rightarrow snížení přetvárné síly a práce, počtu tvářecích operací a časů, ale i vyšší kvalita povrchu po protlačování. Zpevnění v jednotlivých operacích se sčítají. Zpevnění lze odstranit tepelným zpracováním. Při dopředném protlačování ocelí je mezní průřezovou deformací poměrnou $\varepsilon_s \approx 80\%$ a logaritmickou $\varphi_s \approx 1,6$. Dosažitelná hospodárná přesnost protlačků je IT 8 až IT 10.

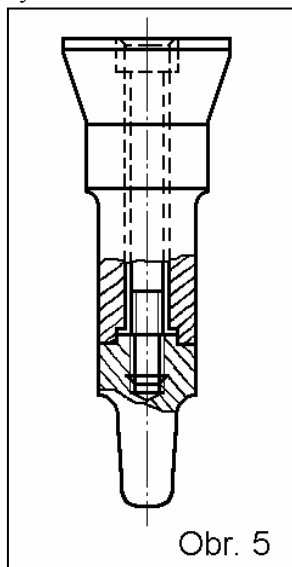
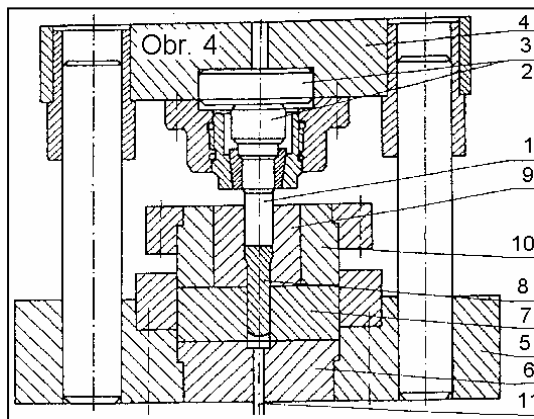
Volba lisu pro protlačování za studena:

Mechanické lisy: klikové, popř. kolenové, vybavené spodním vyhazovačem. Pracovní diagram protlačování musí být v souladu s prac. diagramem lisu.

Hydraulické lisy: svislé i vodorovné. Protlačovací síla nesmí být větší než nominální síla lisu.

Nástroje pro dopředné protlačování:

Sestava nástroje pro dopředné protlačování (obr. 4): 1- průtlačník (obr. 5), 2,3- opěrné desky, 4- upínací deska, 5- základová deska, 6- těleso vyhazovače, 7- opěrná deska, 8- průtlaček, 9- průtlačnice (obr. 6), 10- zděř vnitřní, 11- kolík vyhazovače.



Obr. 5

Materiály jednotlivých částí doporučuje ČSN 22 7005:

průtlačník a průtlačnice - oceli 19 436, 19 437, v extrémních podmínkách materiály SK, popř. kubický nitrid bóru, zbylé části - méně náročné nástrojové a konstrukční oceli.

Dimenzování průtlačnic (obr. 6) se řeší jako namáhání tlustostěnné nádoby vnitřním (protlačovacím) tlakem:

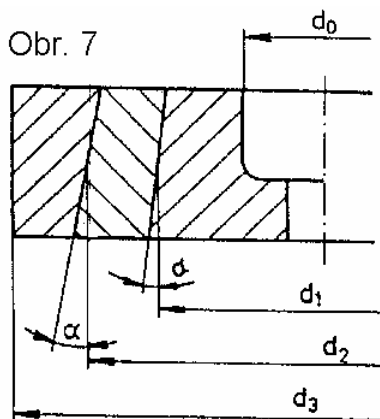
$$\text{Radiální napětí: } \sigma_r = -\sigma_{ds}, \text{ Tečné napětí: } \sigma_t = \sigma_{ds} \frac{(a^2 + 1)}{(a^2 - 1)}, \quad (8)$$

kde $a = r_2/r_1$ - poměr vnějšího a vnitřního poloměru průtlačnice. Kontrolu lze

$$\text{provést prostřednictvím redukovaného napětí: } \sigma_{red} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_t^2} - \sigma_r \sigma_t \leq \sigma_D. \quad (9)$$

$$\text{Přesazení průměru průtlačnice: } \Delta d = \frac{d}{E} (\sigma_t - \mu \cdot \sigma_r). \quad (10)$$

Armování průtlačnic: Jednoplášťové průtlačnice ve většině případech protlačování pevnostně nevyhovují. Běžné je bandážování zděři, umožňuje přenést extrémní namáhání při hospodárném využití materiálu průtlačnice a při snadném způsobu montáže. Armovaný celek se provádí jako dvou až



Obr. 7

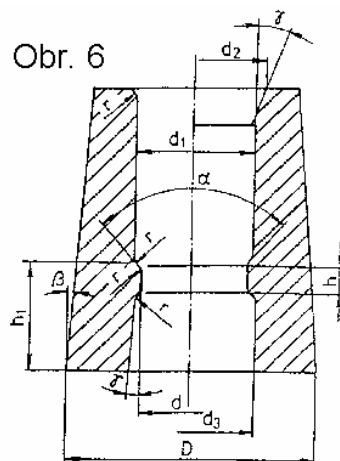
trojdílný (obr. 7, $\alpha = 1^\circ \div 3^\circ$).

Stanovení průměrů jednotlivých částí se provádí prostřednictvím poměrů střed. průměrů průtlačnice a zděři:

$$\begin{aligned} K_{01} &= d_0/d_1 = 0.4 \div 0.6, \\ K_{12} &= d_1/d_2 = 0.4 \div 0.6, \\ K_{23} &= d_2/d_3 = 0.4 \div 0.6, \\ K_{03} &= d_0/d_3 = 0.1 \div 0.2 \end{aligned} \quad (11)$$

Stanovení přesahu pro nalisování

$$\text{zděří za studena: } \Delta d_i = (0.003 \div 0.0045) d_i. \quad (13)$$



Obr. 6

Přesnější výsledky dávají výpočty iterací: např. [2].

Literatura:

- [1] ČSN 22 7005
- [2] ŠTĚPÁNEK, K.-KOZÁK, P.: Strojírenství, 37, 1987, s. 482.

ZPĚTNÉ PROTlačOVÁNÍ

Technologie zpětného protlačování se používá ke zhotovení dutých průtlačků nebo jako vůči směru zdvihu stroje obrácené dopředné protlačování plných těles. Obecně se rozděluje na: zpětné protlačování volné, kdy je průtlačník vtlačován do válcového polotovaru, jehož vnější stěny jsou volné; zpětné protlačování usměrněné, kdy je polotovaz omezen stěnami průtlačnice. Ve strojírenské praxi je převážně užíváno protlačování usměrněné.

ČSN 22 7005

»Protlačování ocelí za studena«:

Norma mimo jiné uvádí formální postupy určování technologických parametrů zpětného protlačování. Jde zejména o deformaci, protlačovací tlak a sílu atd. Dle rozměrů na obr. 1 lze určit průřezovou a podélnou deformaci:

$$\varphi_s = \ln \frac{S_0}{S_0 - S_1} = \ln \frac{D^2}{D^2 - d^2} \quad \varphi_h = \ln \frac{h_0}{h}, \quad (1)$$

kde S_0 - výchozí průřez polotovaru, S_1 - průřez dutiny průtlačku, h_0 - výchozí výška polotovaru.

Protlačovací tlak určíme z rovnice:

$$\sigma_{ds} = 1,152 \cdot \sigma_p \cdot \frac{S_0}{S_1} \left(\log \frac{S_0}{S_0 - S_1} + \frac{S_0}{S_0 - S_1} \cdot \log \frac{S_0}{S_1} + \log \frac{S_1}{S_0 - S_1} \right), \quad (2)$$

kde $\sigma_p = C \cdot \varphi_s^n$. Protlačovací síla je pak dána vztahem: $F_d = \sigma_{ds} S_1$. (3)

Model zpětného protlačování:

Spočívá ve stanovení plochy poměrných napětí v závislosti na obou deformacích průřezové φ_s a podélné

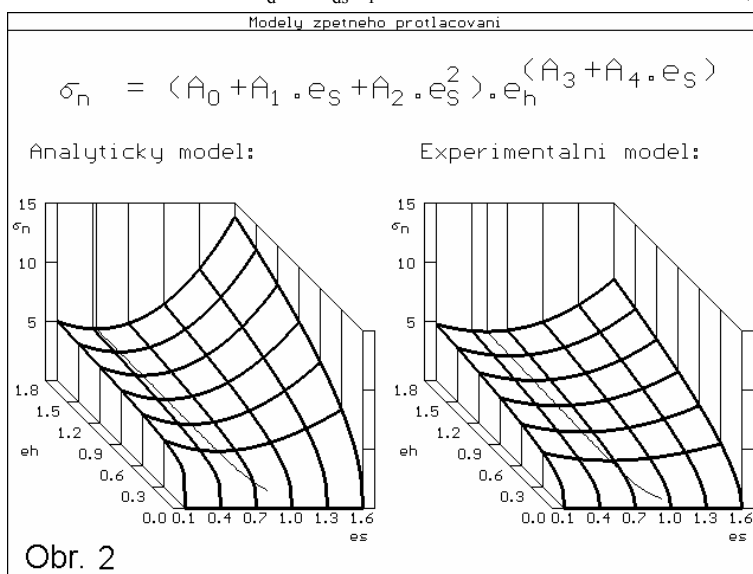
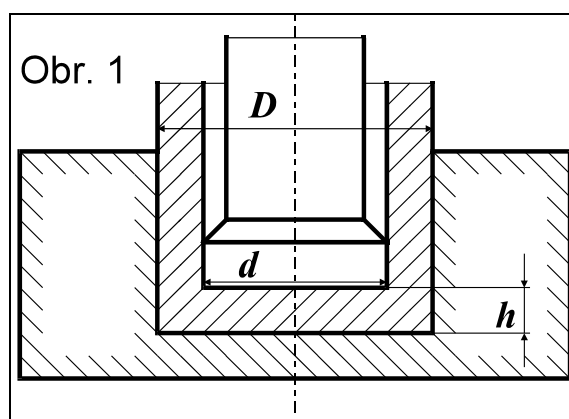
φ_h . Naměřené hodnoty protlačovacích tlaků pro různé materiály byly převedeny v souladu s metodikou modelování na bezrozměrné číslo $\sigma_n = \sigma_{ds} / \sigma_p$, tím byl pro následný model přibližně akceptován vliv materiálu. Experimenty proběhly v rozsahu přirozených deformací $\varphi_s = 0,1 \div 1,6$ a $\varphi_h = 0 \div 1,8$. Pro stejné materiály a rozsahy deformací byly provedeny výpočty metodou charakteristik. Takto získanými hodnotami byly proloženy regresní plochy, jejichž obecná rovnice má tvar:

$$\sigma_n = (A_0 + A_1 \cdot \varphi_s + A_2 \cdot \varphi_s^2) \cdot \varphi_h^{(A_3 + A_4 \cdot \varphi_s)}. \quad (4)$$

Rovnice (4) pro vypočtené hodnoty představuje analytický model a pro naměřené hodnoty experimentální model. Koeficienty této rovnice v obou případech mají hodnoty uvedené v tab. 1:

Tab.1

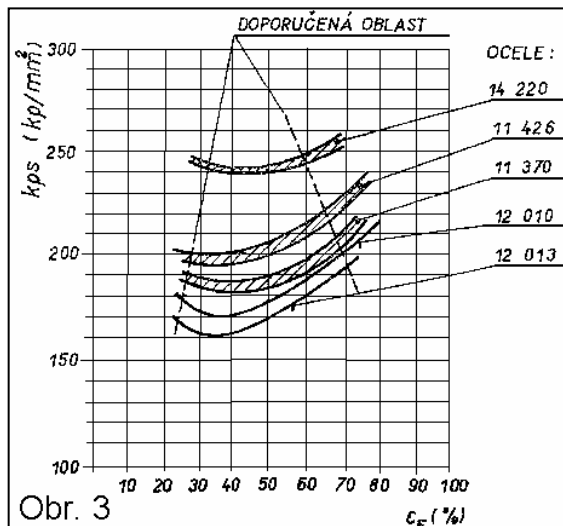
Model:	A_0	A_1	A_2	A_2	A_2
analytický	5,10032	-5,11024	5,42584	0,11026	0,19222
experimentální	4,35878	-3,34248	2,91598	0,26457	0,13136



Tvary ploch pro oba modely jsou znázorněny na obr. 2. Na obou plochách je tenkou čarou provedena křivka minimálních hodnot σ_n , kde poloha φ_{Smin} závisí jen na deformaci φ_h . Výskyt a poloha minima funkce (4) odpovídá přibližně výsledkům z praxe (viz obr. 3). Z obr. 2 vyplývá, že analytický model dává vyšší hodnoty protlačovacích tlaků než experimentální. Odtud plyne doporučení použít experimentální model pro výpočet přesných hodnot, kdežto analytický model se hodí spíše pro stanovení horních mezních hodnot protlačovacích tlaků pro dimenzování nástrojů.

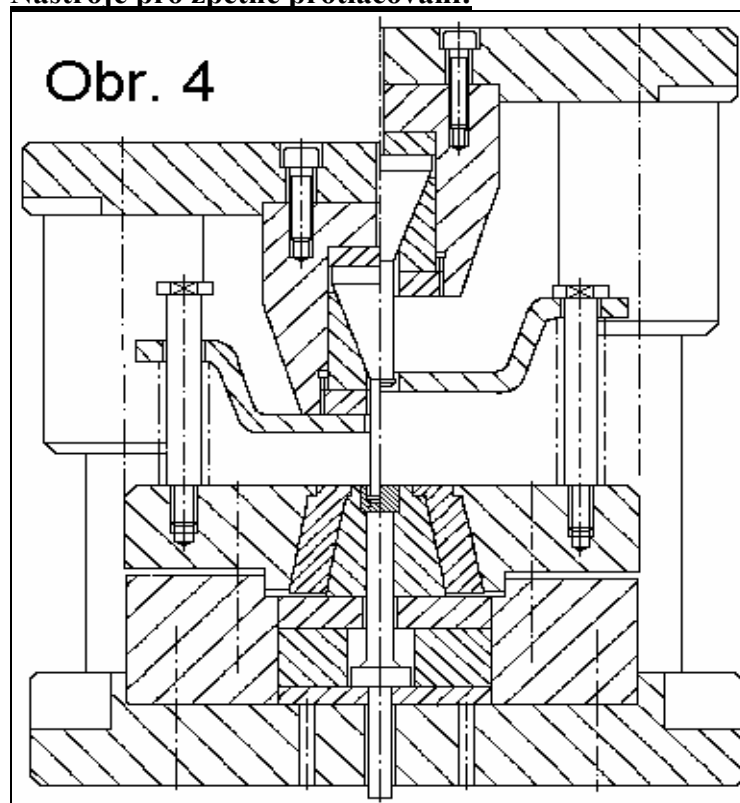
Výpočtem na modelu dle rovnice (4) lze pak určit protlačovací tlak a sílu: $F_d = \sigma_n \sigma_p S_1$.

Pro další technologické parametry platí tytéž směrnice jako pro dopředné protlačování (syllab »Dopředné protlačování«) s následujícím upřesněním: *Hodnota středního přetvárného tlaku nesmí překročit dovolené namáhání v tlaku materiálu činných částí* $\sigma_D \approx 1800 \div 2000$ MPa, vyjímečně až 2700 MPa. Při zpětném protlačování jsou *mezní průřezové deformace* poměrné $\varepsilon_s \approx 30 \div 80$ % a logaritmické $\varepsilon_s \approx 0,35 \div 1,6$. Z rozměrů polotovaru a konečného protlačku se vypočte celkové přetvoření. Překročí-li vypočtené hodnoty přípustné meze, je nutno zvýšit počet operací. Je-li vyčerpána tvárnost materiálu, je nutno zařadit před další tvářecí operaci tepelné zpracování. Pro výběr lisu platí tatáž doporučení, uvedená v syllabu »Dopředné protlačování«.

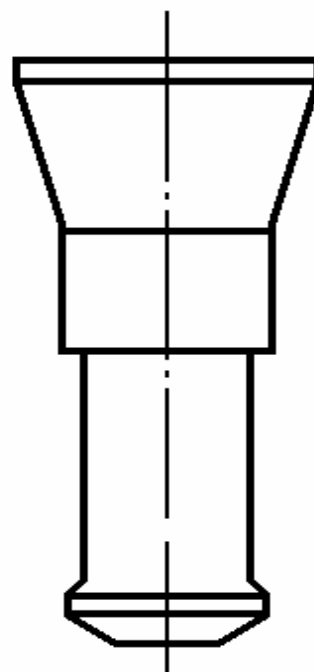


Obr. 3

Nástroje pro zpětné protlačování:



Obr. 4



Obr. 5

Sestava nástroje na obr. 4 má podobnou skladbu jako nástroj pro protlačování dopředné (syl. č. 15). Průtláčnický pro zpětné protlačování znázorňuje obr. 5. Pro dimenzování nástrojů platí opět směrnice dle ČSN 22 7005 a direktivy uvedené v syllabu »Dopředné protlačování« pro dopředné protlačování. Tepelným zpracováním NO lze docílit 3000 až 3500 MPa dovoleného namáhání.

Literatura:

ČSN 22 7005

HRUBÝ, J.-ČADA, R.-RUSZ, S.: Strojírenské tváření. Ostrava, VŠB 1993.

Výpočet trojdílné průtlačnice

Ing. K. ŠTĚPÁNEK — ing. P. KOZÁK, k. p., OEZ Letohrad

Článek se zabývá konkrétní aplikací objemového tváření za studena, přičemž ukazuje na skutečnost, že výroba složitějších tvarů nutně směřuje k aplikaci stále větších tvářecích tlaků. Uvedený výpočet umožňuje lepší dimenzování trojdílné průtlačnice. Rozměry jsou ve srovnání s rozměry získanými empirickými výpočty podstatně menší. To vede k značným úsporám nástrojových ocelí a usnadňuje vyrobitelnost nástroje a manipulaci s ním.

Objemové tváření za studena přináší velké úspory pracnosti i materiálu vyráběných součástí. Odhaduje se, že každých 5 let vzrůstá počet tvarů, vyrobitelných touto technologií o 50 % [1]. Výroba složitějších tvarů nutně směřuje k aplikaci stále vyšších tvářecích tlaků. Tím nabývá na významu otázka únosnosti průtlačnice a především jejich pevnostního výpočtu. Běžně používané dvoudílné celky nepostačují, neboť při vyšších tlacích vycházejí pro součásti běžných průměrů velmi rozměrné zděře a navíc soustava není schopna přenést tvářecí tlak vyšší než asi 2 000 MPa, při předpokládaném použití nejkvalitnějších ušlechtilých nástrojových ocelí.

Pro tyto účely je vhodnější konstruovat nástroj jako trojdílný armovaný celek. Pevnostním výpočtem takového celku se zabývá náš příspěvek.

K tomu, abychom získali celek nejmenších rozměrů, musí být všechny tři nádoby zatíženy na maximum dovoleného namáhání. Odvozením průběhu napětí v tlustostěnných nádobách lze dokázat, že maximální intenzita napětí je vždy na vnitřním povrchu nádoby, [2].

Platí tedy pro vnitřní povrch nádoby:

$$\sigma_i = \sigma_D, \quad (1)$$

kde

σ_i — intenzita napětí,
 σ_D — dovolené napětí.

Doporučená tvrdost průtlačnic se pohybuje v rozmezí 60 ÷ 62 HRC, zděti 48 ÷ 52 HRC. Při těchto hodnotách tvrdosti a jim odpovídající pevnosti se již poměrně značně odlišují hodnoty meze křehké pevnosti

v tahu σ_{Rt} a meze křehké pevnosti v tlaku σ_{Rd} , takže pro koeficient $\nu = \sigma_{Rt}/\sigma_{Rd}$ platí, že $\nu < 1$. Pro výpočet intenzity napětí použijeme tedy některou z podmínek křehké pevnosti.

Rozborem zatížení elementu tlustostěnné válcové nádoby lze odvodit základní vztahy pro výpočet radiálního, tangenciálního a osového napětí elementu: [2]

$$\sigma_t = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + (p_1 - p_2) \frac{r_1^2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{\rho^2}, \quad (2)$$

$$\sigma_r = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - (p_1 - p_2) \frac{r_1^2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{\rho^2}, \quad (3)$$

kde

σ_t — tangenciální napětí,
 σ_r — radiální napětí,
 σ_o — osový napětí,
 r_1 — vnitřní poloměr nádoby,
 r_2 — vnější poloměr nádoby,
 $\sigma_{iv} = p_1$ — vnitřní tlak = přetvárný odpor, vypočtený se zřetelem na stupeň přetvoření, křivku zpevnění a další vlivy,
 p_2 — vnější tlak,
 ρ — obecný poloměr, na kterém je počítáno napětí.

Rozborem napjatosti lze dokázat, že vždy, když $p_1 > p_2$, platí:

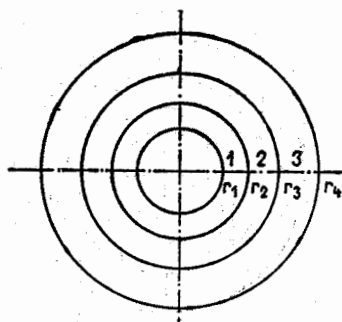
$$\sigma_t > \sigma_o > \sigma_r, \quad (4)$$

a protože

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \quad (5)$$

platí, že

$$\sigma_1 = \sigma_i; \sigma_2 = \sigma_o; \sigma_3 = \sigma_r.$$



Obr. 1

Osové napětí σ_r závisí na tvaru průtláčnice, způsobu protlačování, velikosti tření a dalších faktorech. Pro jednotlivé případy se značně mění a jeho výpočet není přesný. Celkový výpočet průtláčnic by byl s jeho uvažováním velmi složitý a nepřehledný.

V oboru rovinné napjatosti dává dobré teoretické výsledky, souhlasící s experimentálními, Mohrova podmínka křehké pevnosti. Tato podmínka neuvažuje napětí σ_z , takže při jejím použití není nutné osové napětí uvažovat. V dalším výpočtu budeme uvažovat průběh intenzity napětí podle této hypotézy. Jestliže aproximujeme mezní obálku v Mohrově diagramu přímkou, získáme její rovnici ve tvaru:

$$\sigma_i = \sigma_1 - \nu \sigma_3 = \sigma_{Ri} \quad (6)$$

a se zřetelem na zvolenou bezpečnost $k = \sigma_{Ri}/\sigma_D$ a (4) a (6) potom ve tvaru:

$$\sigma_i = \sigma_1 - \nu \sigma_3 = \sigma_D, \quad (7)$$

kde σ_D je dovolené napětí.

Při popisu napětového stavu budeme postupovat metodou superpozice ve stejném sledu, v jakém probíhá postupné zatěžování složeného celku. Obvykle se doporučuje zahájit slisování celku nalisováním vnějšího dílu.

Celkový pracovní tlak na styčné ploše 2/3 je:

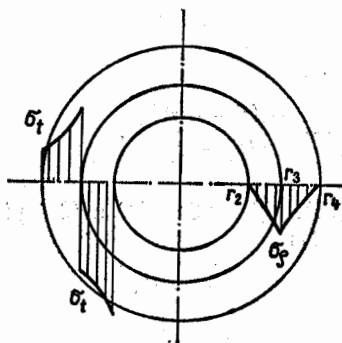
$$p_3 = \bar{p}_3 + p_3^0 + p_3^*, \quad (8)$$

kde

\bar{p}_3 — tlak vzniklý zalisováním 2 do 3,

p_3^0 — tlak vzniklý na ploše 2/3 zalisováním průtláčnice 1 do soustavy 2—3,

p_3^* — tlak vzniklý na ploše 2/3 při zatížení průtláčnice tvářecím tlakem.



Obr. 2

Tlak \bar{p}_3 vypočteme běžným způsobem z Hookova zákona:

$$\Delta r_3 = r_3 \cdot 1/E (\sigma_1 - \mu \sigma_3), \quad (9)$$

kde Δr_3 — přesah na poloměru r_3 ,

E — modul pružnosti, stejný pro všechny tři nádoby.

Dosažením z [2], [3] a úpravou dostaneme

$$\bar{p}_3 = E \cdot \frac{\Delta r_3}{r_3} \cdot \frac{(r_4^2 - r_3^2)(r_3^2 - r_2^2)}{2r_3^2(r_4^2 - r_2^2)}. \quad (10)$$

Tento tlak vyvolá v obou nádobách 2 a 3 radiální a tangenciální napětí. Jejich průběh je schematicky znázorněn na obr. 2. Budeme-li nyní tuto soustavu zatěžovat vnitřním přetlakem, bude se deformovat tak, jako by byla z jednoho kusu.

Nalisování 3 na 2 vyvolá „dýchnutí“ u'_2 na poloměru r_2 , které vypočteme rovněž z Hookova zákona. Dosažením a úpravou:

$$|u'_2| = \frac{2\bar{p}_3 r_2^2}{E(r_3^2 - r_2^2)}. \quad (11)$$

Na poloměru r_2 je tedy po nalisování 3 na 2 celkový přesah

$$u_{2\text{CELK}} = \Delta r_2 + |u'_2|, \quad (12)$$

kde Δr_2 je konstrukční přesah na poloměru r_2 .

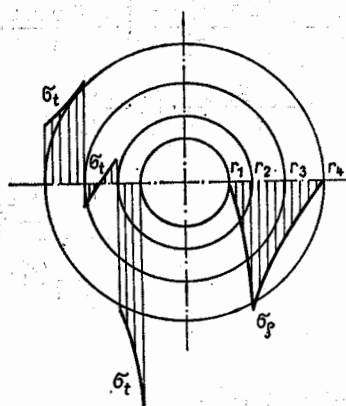
Následuje nalisování průtláčnice 1 do soustavy 2—3. Celkový tlak na styčné ploše 1/2 získáme superpozicí:

$$p_2 = \bar{p}_2 + p_2^0 + p_2^*,$$

kde \bar{p}_2 — tlak způsobený přesahem Δr_2 ,

p_2^0 — tlak způsobený „dýchnutím“ u'_2 ,

p_2^* — tlak vzniklý na ploše 1/2 při zatížení tvářecím tlakem.



Obr. 3

Tlak vzniklý zalisováním 1 do soustavy 2—3 zjistíme analogicky jako (10)

$$\bar{p}_2 + p_2^0 = E \cdot \frac{u_{2\text{CELK}}}{r_2} \cdot \frac{(r_4^2 - r_2^2)(r_2^2 - r_1^2)}{2r_2^2(r_4^2 - r_1^2)}. \quad (13)$$

Tlak p_2^0 vypočteme jako záporně vzaté radiální napětí na poloměru r_3 , vzniklé zalisováním 1 do soustavy 2—3

Dosazením do (3) a úpravou:

$$p_3^0 = -\frac{Eu_{2\text{CELK}}}{r_2} \frac{(r_2^2 - r_1^2)(1 - r_4^2/r_3^2)}{2(r_4^2 - r_1^2)}. \quad (14)$$

V této fázi je tlak na ploše 2/3 sečtením a úpravou (10) a (14)

$$\bar{p}_3 + p_3^0 = \frac{E}{2r_3^2} (r_4^2 - r_3^2) \left[\frac{\Delta r_3}{r_3} \cdot \frac{(r_3^2 - r_2^2)}{r_4^2 - r_2^2} + \frac{u_{2\text{CELK}}}{r_2} \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \right]. \quad (15)$$

Průběh napětí ve slisovaném trojdílném celku, nezátíženém tvářecím tlakem, zachycuje obr. 3. Jednotlivá radiální a tangenciální napětí lze vypočítat dosazením příslušných hodnot do (2), (3).

Při zatížení průtlačnice tvářecím tlakem vzniknou na jednotlivých poloměrech tlaky, vypočtené podle (3) se zřetelem na to, že

$$p = -\sigma_r, \quad (16)$$

kde p — obecný tlak na styčné ploše.

Dosazením do (3) a úpravou získáme:

$$p_2^* = -\frac{p_1 r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_4^2}{r_2^2} \right), \quad (17)$$

$$p_3^* = -\frac{p_1 r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_4^2}{r_3^2} \right). \quad (18)$$

Celková superponovaná napětí na plochách 2/3 a 1/2 jsou:

Sloučením (13) a (17) a úpravou:

$$p_2 = E \frac{u_{2\text{CELK}}}{r_2} \cdot \frac{(r_4^2 - r_2^2)(r_2^2 - r_1^2)}{2r_3^2(r_4^2 - r_1^2)} - \frac{p_1 r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_4^2}{r_2^2} \right) \quad (19)$$

a analogicky z (15) a (18):

$$p_3 = \frac{E}{2r_3^2} (r_4^2 - r_3^2) \left[\frac{\Delta r_3}{r_3} \cdot \frac{r_3^2 - r_2^2}{r_4^2 - r_2^2} + \frac{u_{2\text{CELK}}}{r_2} \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] - \frac{p_1 r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \cdot \left(1 - \frac{r_4^2}{r_3^2} \right). \quad (20)$$

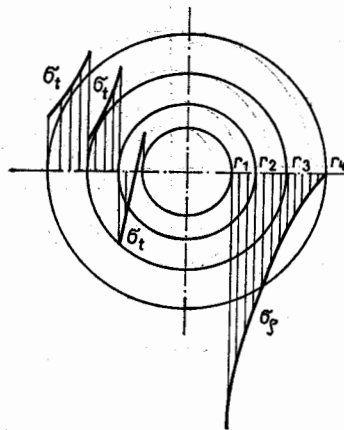
$$\Delta r_3 = \frac{p_3 + \frac{p_1 r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_4^2}{r_3^2} \right)}{\frac{E}{2r_3^2} (r_4^2 - r_3^2)} - \frac{2r_2^2}{(r_4^2 - r_2^2)E} \left(p_2 + \frac{p_1 r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_4^2}{r_2^2} \right) \right) \quad (24)$$

a Δr_2 dosazením a úpravou

$$\Delta r_2 = \left[p_2 + \frac{p_1 r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_4^2}{r_2^2} \right) \right] \cdot \frac{2r_3^2(r_4^2 - r_1^2)}{E(r_4^2 - r_2^2)(r_2^2 - r_1^2)} - \frac{\Delta r_3(r_4^2 - r_3^2)r_2}{r_3(r_4^2 - r_2^2)}. \quad (25)$$

Další dvě rovnice získáme z podmínky, že hledaná soustava má mít při požadované únosnosti nejmenší možné rozměry. V této úvaze budeme považovat tlak p_1 , který je dán, za proměnnou podle funkčního vztahu (23) a hledat její lokální maximum, tj. maximum funkční závislosti $p_1 = f(r_2, r_3)$.

Obr. 4



Vyjádříme-li rovnicemi podmínku, že každá z nádob je maximálně využita, pokud intenzita napětí na vnitřním povrchu je rovna dovolenému napětí, pak po úpravě získáme z této úvahy soustavu 3 rovnic, vyjadřujících maximální možné tlaky na styčných plochách 3/2 a 2/1 a vnitřním povrchu tvářecí průtlačnice.

Z (2), (3), dosazením do (7) a úpravou

$$p_3 = \frac{\sigma_{D3}}{\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_3^2} + \nu} \quad (21)$$

$$p_2 = \frac{\sigma_{D2} + \frac{2p_3 r_3^2}{r_3^2 - r_2^2}}{\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + \nu} \quad (22)$$

$$p_1 = \frac{\sigma_{D1} + \frac{2p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}}{\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \nu} = \sigma_{tv} \quad (23)$$

kde $p_1 = \sigma_{tv}$ tvářecí tlak.

Rovnice (23), (22), (21), (20) a (19) vytvářejí celkem soustavu pěti rovnic o 7 neznámých p_2 , p_3 , r_2 , r_3 , r_4 , Δr_2 a Δr_3 .

Úpravou lze vyjádřit Δr_3 a Δr_2 :

Dosazením za $u_{2\text{CELK}}$ z (19) a úpravou:

K soustavě (21), (22), (23), (24) a (25) přibudou dvě rovnice (26) a (27)

$$\frac{\partial p_1}{\partial r_2} = 0, \quad (26)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial r_3} = 0. \quad (27)$$


$$a_1 = \frac{\sigma_{D1}}{\sigma_{tn}}; \quad a_2 = \frac{\sigma_{D2}}{\sigma_{tn}}; \quad a_3 = \frac{\sigma_{D3}}{\sigma_{tn}};$$


mat. 42 3901

$$y_2 = \frac{p_2}{\sigma_{tm}}; \quad y_3 = \frac{p_3}{\sigma_{tm}}; \quad y_1 = \frac{p_1}{\sigma_{tm}} = 1$$

$$(y_2)_{n-1} = -\frac{a_2}{1-\nu} + \sqrt{\left(\frac{2a_2}{1-\nu^2} + 1 - \frac{a_1}{1+\nu}\right)(y_3)_{n-1} + \left(\frac{a_2}{1-\nu}\right)^2 - \frac{a_2(a_1 - a_2 - 1 - \nu)}{1-\nu^2}}$$

$$(y_3)_n = -\frac{a_3}{1-p} +$$

$$+ \sqrt{\frac{a_3}{1-p} (y_2)_{n-1} + \left(\frac{a_3}{1-p}\right)^2 - \frac{a_3(a_2 - a_3)}{1-p^2}},$$

V jazyku BASIC PLUS je program výpočtu rozměrů a konstrukčních přesahů trojdílné průtlačnice následující:

$$S_1 = \sigma_{D_1}$$
$$S_2 = \sigma_{D2}$$
$$S_3 = \sigma_{D3}$$
$$\mathbf{M} = \mathbf{v}$$
$$D_2 = \Delta r_2$$
$$D3 = \Delta r_8$$

$$x_2 = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2; \quad x_3 = \left(\frac{r_3}{r_2}\right)^2; \quad x_4 = \left(\frac{r_4}{r_3}\right)^2.$$

Potom: $\frac{\partial p_1}{\partial r_2} = \sigma_{iv} \frac{\partial y_1}{\partial r_2}; \quad \frac{\partial p_1}{\partial r_3} = \sigma_{iv} \frac{\partial y_1}{\partial r_3}$

dosazením transformací a úpravou:

(23):

$$x_2 = \frac{a_1 + 1 - \nu}{a_1 + 2y_2 - 1 - \nu}, \quad (28)$$

(22):

$$y_3 = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \nu + \frac{1-\nu}{x_3} \right) y_2 - a_2 \left(1 - \frac{1}{x_3} \right) \right], \quad (29)$$

(21):

$$x_4 = \frac{a_3 + (1 - \nu) y_3}{a_3 - (1 + \nu) y_3}, \quad (30)$$

(27):

$$y_2 = \frac{a_2 - a_3}{1 + \nu} + 2y_3 + \frac{1 - \nu}{a_3} y_3^2, \quad (31)$$

(26):

$$x_3 = \frac{2a_2 - a_1(1 - \nu) + 1 - \nu^2}{(1 + \nu)(a_1 + 2y_2 - 1 - \nu)}. \quad (32)$$

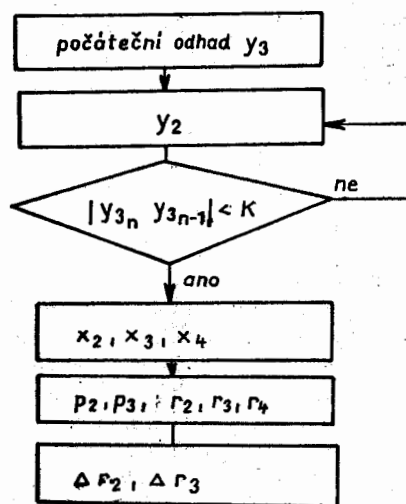
Vyloučením proměnné x_3 z rovnic (29) a (32) vznikne spolu s rovnicí (31) soustava dvou kvadratických rovnic:

$$y_2^2 + \frac{2a_2}{1-\nu} y_2 + \frac{a_2(a_1 - a_2 - 1 - \nu)}{1 - \nu^2} +$$

$$+ \frac{(a_1 - 1 - \nu)(1 - \nu) - 2a_2}{1 - \nu^2} y_3 = 0, \quad (33)$$

$$y_3^2 + \frac{2a_3}{1-v} y_3 + \frac{a_3(a_2 - a_3)}{1-v^2} - \frac{a_3}{1-v} y_2 = 0. \quad (34)$$

Tuto soustavu lze řešit iterací volbou počáteční hodnoty $(y_s)_0$ podle výpočtového algoritmu: $(y_s)_0 = 0,08$ až $0,33$

**Obr. 7**


```

1      EXTEND
3      REM VYPOCET TROJDILNE PRUTLACNICE
5      PRINT "HODNOTY NAPETI UDAVEJTE V MEGAPASCALECH"
\     PRINT "HODNOTY POLOMERU UDAVEJTE V MILIMETRECH"
\     PRINT "PRETVARNY ODPOR JE HODNOTA VYPOCTENA S OHLEDEM"
\     PRINT "NA STUPEN DEFORMACE, KRIVKU ZPEVNENI A DALSI VLIVY"
10     INPUT "PRETVARNY ODPOR = "; P1
11     INPUT "DOVOLENE NAMAHA NI PRUTLACNICE = "; S1
12     INPUT "DOVOLENE NAMAHA NI 1.ZDERE = "; S2
13     INPUT "DOVOLENE NAMAHA NI 2.ZDERE = "; S3
14     PRINT "POMER MEZE KREHKE PEVNOSTI V TAHU KU MEZI" &
\     INPUT "KREHKE PEVNOSTI V TLAKU PRO MATERIAL NASTROJE = "; M
15     INPUT "POLOMER MAXIMALNI DUTINY V PRUTLACNICI = "; R1
16     INPUT "YOUNGUV MODUL PRUZNOSTI MATERIALU NASTROJE = "; E
20     Y3=300/P1
30     A1=S1/P1
40     A2=S2/P1
50     A3=S3/P1
60     R=A2/(1-M)
70     B=2*A2/(1-M^2)+1-A1/(1+M)
80     C=R^2-A2*(A1-A2-1-M)/(1-M^2)
90     D=A3/(1-M)
100    G=D
110    F=D^2-A3*(A2-A3)/(1-M^2)
120    L=Y3
130    Y2=-R+SQR(B*L+C)
140    Y3=-D+SQR(D*Y2+F)
150    IF ABS(Y3-L)<.002 GO TO 160 ELSE GO TO 120
160    X2=(A1+1-M)/(A1+2*Y2-1-M)
170    X3=((2*(A2+Y2*(1-M)))/(A1+2*Y2-1-M)-1+M)/(1+M)
180    X4=(A3+Y3*(1-M))/(A3-Y3*(1+M))
190    R2=SQR(X2*R1^2)
200    R3=SQR(X3*R2^2)
210    R4=SQR(X4*R3^2)
220    P3=(S3*(R4^2 - R3^2))/(R4^2*(1+M) + R3^2*(1-M))
230    P2=(R3^2*(S2+2*P3)-R2^2*S2)/(R3^2*(1+M)+R2^2*(1-M)).
240    D3=((P3+P1*R1^2*(1-R4^2/R3^2)/(R4^2-R1^2))/ &
        (E*(R4^2-R3^2)/(2*R3^2)))-2*R2^2*(P2+P1*R1^2* &
        (1-R4^2/R2^2)/(R4^2-R1^2))/(E*(R4^2-R2^2))/ &
        ((R3^2-R2^2)/(R3*(R4^2-R2^2)))
250    D2=(P2+P1*R1^2*(1-R4^2/R2^2)/(R4^2-R1^2))*2*R2^3* &
        (R4^2-R1^2)/(E*(R4^2-R2^2)*(R2^2-R1^2))-D3*R2* &
        (R4^2-R3^2)/(R3*(R4^2-R2^2))
260    PRINT "R2= ", R2
270    PRINT "R3= ", R3
280    PRINT "R4= ", R4
290    PRINT "D2= ", D2
300    PRINT "D3= ", D3
302    PRINT "END"
310    END

```

3. Závěr

Uvedený způsob výpočtu byl použit pro trojdílné průtlačnice pro pýchování šroubu podle obr. 5 a sdružené protlačování kontaktu podle obr. 6. Obě součásti jsou tvářeny za studena, na jednu operaci. V obou případech při použití empirického výpočtu rozměrů průtlačnice praskly již při prvních kusech, zatímco při použití tohoto exaktního výpočtu vyhovují a bylo v nich nalisováno již několik desítek tisíc kusů. Průměry průtlačnice a zděří jsou navíc ve srovnání s prů-

tlačnicemi a zděřemi podle empirických výpočtů podstatně menší, což přináší značné úspory nástrojových ocelí, usnadňuje výrobu nástroje a manipulaci s ním.

Literatura

- [1] The growing capabilities and markets for cold extrusion. Precision Metal/September 1977.
- [2] FARLÍK, A. - ONDRAČEK, E.: Pružnost a pevnost. SNTL 1968.

Lektor: doc. ing. B. Rudolf, DrSc.