BRNO 2009

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

Stínidlo průmyslového svítidla z plechu - návrh technologie výroby

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE **JIŘÍ ZELINKA**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE **doc. Ing. Jindřich Špaček, CSc.**
SUPERVISOR

BRNO 2009

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je porovnat technologie výroby hlubokého tažení pro zadaný typ výtažku. Jedná se o stínidlo průmyslového svítidla z plechu. Porovnávat se bude hydromechanické tažení, postupné hluboké tažení a kovotlačitelská technologie. Bude naznačen postup výpočtů parametrů prostého hydromechanického tažení.

Převážná část bakalářské práce je zaměřena na popis jednotlivých technologií a na názornou ukázku nákladnosti jednotlivých operací.

Klíčová slova

Tváření, plastická deformace, jednoosá napjatost, Hluboké tažení, hydromechanické tažení, kalibrační tažení, hydromechanický tažný lis, výtažek, rotační tlačení, technologie výroby, lis, kovotlačení, tváření

ABSTRACT

The aim of this Batchelor Thesis is to compare different deep drawing technologies, for given deep-drowen product – an industrial lamp, made of steel brass. The technologies to compare will be hydro-mechanical drawing, gradual deep drawing and metal stamping technology. The procedure of simple hydro-mechanical drawing parameters calculation will be indicated.

The prevalent part of the Thesis is aimed at different technologies description, and on an illustrating example of individual operations expensiveness.

Keywords

Forming, plastic deformation, uniaxial state of stress, deep drawing, hydromechanical drawing, final drawing, hydromechanical drawing press, part, spinning, metal stamping

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZELINKA Jiří: *Stínidlo průmyslového svítidla z plechu - technologie výroby.* Brno, 2009. 41 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. Ing. Jindřich Špaček, CSc.

Dostupné z: http://www.ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci na téma Stínidlo průmyslového svítidla z plechu - návrh technologie výroby jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 16. 10. 2009

……
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Jindřichu Špačkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

1. Popis a výkres součásti *8*

2. Základní pojmy *9*

3. Plošné tváření *11*

3.1 Hluboké tažení **11**

3.1.1 Princip jednoduchého tažení 11

3.1.1.1 Určení velikosti přístřihu 13

3.1.2 Víceoperační tažení 14

3.1.2.1 Součinitel tažení m 14

3.1.3 Tažný nástroj 15

3.1.4 Výpočet součásti 17

3.1.4.1 Výpočet ploch 17

3.1.4.2 Celkový obsah 18

3.1.4.3 Výpočet průměru přístřihu 18

3.1.4.4 Poměrná tloušťka polotovaru 18

3.1.4.5 Výpočet počtu tahů 18

3.1.4.6 Výpočet tažné síly 20

3.1.4.7 Výpočet síly přidržovače 20

3.1.4.8 Síla dalších tahů 20

3.2 Kovotlačení **21**

3.2.1 Přednosti a nevýhody rotačního tlačení 22

3.3 Hydromechanické tažení **23**

3.3.1 Charakteristika 23

3.3.2 Přesnost výtažků 24

3.3.3 Princip 24

3.3.4 Výhody a nevýhody 25

3.3.5 Základní výpočty a parametry 26

3.3.5.1 Tlak kapaliny 26

3.3.5.2 Tažná síla - F_t 26

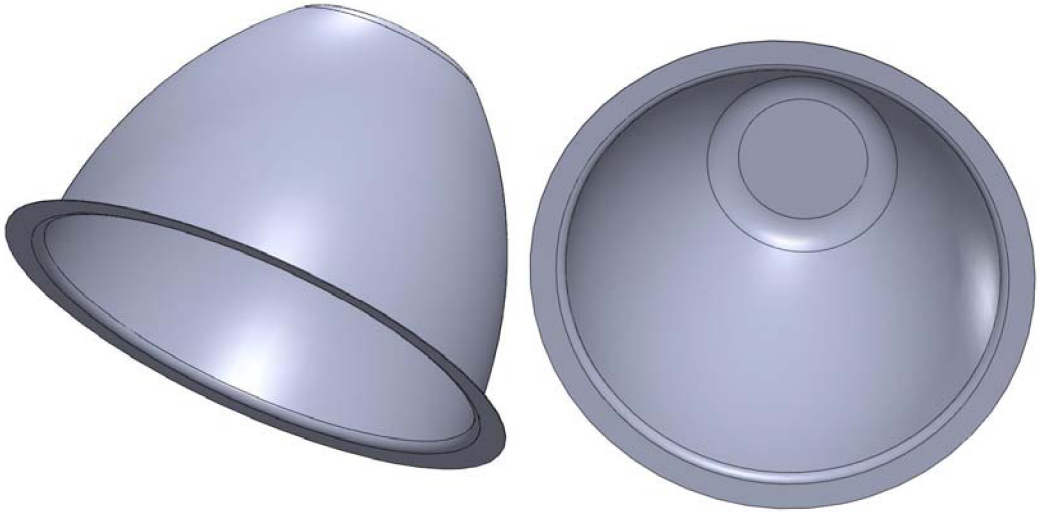
3.3.5.3 Přidržovací síla - F_p 26

3.3.5.4 Tažná vůle – z 26

3.3.5.5 Geometrické charakteristiky 27
3.3.6 Výpočet hydromechanického tažení 27
3.3.6.1 Postup tažení při hloubce vniku 1 mm a při úhlu sklonu β = 1° 28
3.3.6.2 Postup tažení při hloubce vniku 1 mm a při úhlu sklonu β = 45° 31
3.3.6.3 Postup tažení při hloubce vniku 200mm a při úhlu sklonu β = 50° 33
3.3.6.4 Postup tažení při hloubce vniku 200 mm a při úhlu sklonu β = 89° 35
4. Závěr ***37***
5. Seznam použitých zkratek a symbolů ***38***
6. Použitá literatura ***40***
6. Použitá literatura ***40***
7. Seznam příloh ***41***

1. Popis a výkres součásti

Aby bylo možné porovnat jednotlivé technologie výroby, byla zvolena pro tuto práci součást svítidla, a to stínidlo průmyslového svítidla. Součást je vyrobena z hlubokotažného plechu o síle 1mm a materiálu DC 01. Polotovarem je přístřih o průměru 865mm. Součást není nijak staticky ani dynamicky namáhána, je umístěna pod stropem výrobní haly a slouží pouze pro stínění a usměrňování světla. Svítidlo má eliptický tvar.



Obr.1: 3D pohled součásti

Materiál: DC 01 (ČSN 411320, 1.0320)

Tab. 1: Tabulka vhodných materiálů pro hluboké tažení a jejich vlastnosti [7]

ČSN	EN	DIN	W.Nr.	BS	GOST	Charakteristické vlastnosti	Příklady užití
HLUBOKOTAŽNÉ OCELI							
11300	DC 03 FeP03		1.0314		05 kp 08 kp	vhodná k hlubokému tažení, dobře svařitelná	hutní průmysl (profily, svařované trubky), automobilový průmysl (výlisky), strojírenství (ložiska, radiátory), spotřební průmysl (galanterie)
11301	DC 03 FeP03	St 3 St 13 USt 3 USt 13	1.0333	2; 3 CR 2; 3 CS 2; 3 HR 2; 3 HS	08 Ju		
11305	DC 04 FeP04	St 4 St 14	1.0338	1; 2 CR 1; 2 CS 1; 2 HR 1; 2 HS	08 Ju 08 JuA		
11320	DC 01 FeP01	St 2 St 12 St 22 StW 22	1.0320 1.0330 1.0332	4 CR 4 CS 4 HR 4 HS	15 kp		
11321	DC 01 DC 03 FeP01	St 2 St 3 St 12 St 13 USt 3 USt 13	1.0226 1.0330 1.0332 1.0333	2; 3; 4 CR 2; 3; 4 CS 2; 3; 4 HR 2; 3; 4 HS	08 Ju 15 kp		

Značka oceli	Stav	Pevnost v tahu Rm	Tažnost A_{11}min	Chemické složení (hmotnost v %)													
		MPa	%	C	Mn max	Si max	P max	S max	Cr	Ni	Al min	Mo	V	N max	Cu max	Nb max	Ti max
HLUBOKOTAŽNÉ OCELI																	
11300	.20 .21	270 - 370 270 - 390	34 30	max 0,09			0,040	0,040									
11301	.21	280 - 370	31 2)	max 0,08	max 0,4		0,025	0,025									
11305	.20 .21	270 - 350 290 - 360	36 34	max 0,07	0,4	0,03	0,025	0,025			0,025						
11320	.20 .21	270 - 370 290 - 390	32 28	max 0,11			0,045	0,045									
11321	.21	280 - 380	29 2)	max 0,1	max 0,45		0,030	0,030									

2. Základní pojmy

Technologie tváření kovů

Tváření kovů je technologický proces, při kterém dochází ke změně tvaru výrobku nebo polotovaru působením vnějších sil. Při tváření vznikají plastické deformace, které vznikají v okamžiku dosažení napětí na mezi kluzu pro daný materiál. Plastická deformace je pohyb jednotlivých částeček kovů vůči sobě [1].

Dle velikosti zatížení rozdělujeme dva typy deformace:

a) Pružná deformace:

Na těleso působí tak velká síla, že po odlehčení se těleso vrátí do svého původního stavu dle Hookova zákona [1].

Hookův zákon:

Normálové napětí je přímo úměrné relativnímu prodloužení.

$$\sigma_n = E \cdot \varepsilon$$

E - **modul pružnosti [MPa]** – je to normálové napětí, které by v předmětu bylo, když by se prodloužilo o svoji délku

b) Plastická deformace

Na těleso působí tak velká síla, že po odlehčení zůstane těleso v deformovaném stavu [1].

Výhodou tváření je vysoké využití materiálu, vysoká produktivita práce a velmi dobrá rozměrová přesnost tvářených výrobků. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena strojů a nástrojů a omezení rozměrů konečného výrobku.

Nejdůležitějším a nejzákladnějším parametrem rozdělení technologií pro zpracování kovů je teplota tváření. Důležitou teplotou je rekrystalizační teplota (cca. 0,4 teploty tání kovu) [1].

Tvářením za studena (tváření pod rekrystalizační teplotou) dochází ke zpevňování materiálu. Zrna se deformují ve směru tváření, vytváří se textura, tím se materiál zpevní a zvyšují se jeho mechanické vlastnosti (mez pevnosti a mez kluzu) a klesá tažnost.

Výhodou je vysoká přesnost rozměrů, kvalitní povrch (nevznikají okuje) a zlepšování vlastností zpevněním.

Nevýhodou je nutnost používat velké tvářecí síly, nerovnoměrné zpevňování a omezená tvárnost materiálu [1].

Tváření za tepla probíhá nad rekrystalizační teplotou. Materiál se nezpevňuje a k tváření stačí síly až desetkrát menší než u tváření za studena. Nevzniká textura, ale povrch je nekvalitní vlivem okujení [1].

Odpory při tváření:

Deformační odpor σ_D (technologický):

- všechna napětí v deformovaném materiálu, která působí proti napětím vyvolaných deformační silou [1]

Přirozený přetvárný odpor σ_P:

- odpor materiálu proti působení vnějších sil za podmínek jednoosého stavu napjatosti [1]

Deformační odpor σ_{dsk} (skutečný):

- napětí, které je potřeba překonat při deformaci konkrétního materiálu [1]

3. Plošné tváření

Mezi plošné tváření lze zatřídit: stříhání, ohýbání, tažení a tvarování.

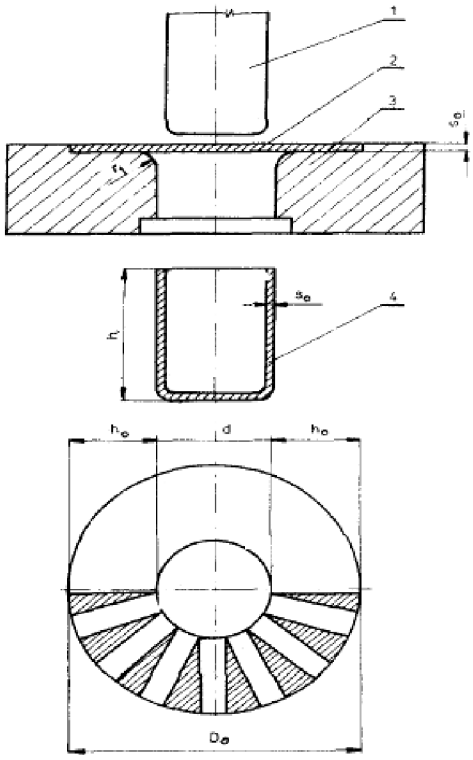
Během plošného tváření působí na těleso v plastickém stavu vnější síla, která v tělese zvyšuje napětí, které brání deformaci. Tato deformace se nazývá přetvoření nebo také plastická deformace.

Při zatížení tělesa se plastická a pružná deformace vyskytují současně. Po odlehčení součásti pružná deformace zmizí a zůstane pouze plastická, která má za následek právě tu danou deformaci [1].

3.1 Hluboké tažení

3.1.1 Princip jednoduchého tažení

Jedná se o technologický proces, kdy se z rovinného plechu (rondelu) vyrobí duté těleso. Mělké výtažky se většinou vyrábějí na jednu operaci. Hluboké výtažky se vyrábějí na více operací a vyplývá to ze stupně deformace ε. Při tažení dochází k přesunu materiálu. Vytlačování materiálu je způsobeno tangenciálním tlakovým napětím σ. Materiál se vytlačuje směrem k obvodu a tím vzniká výška výtažku (Obr. 2) [1].

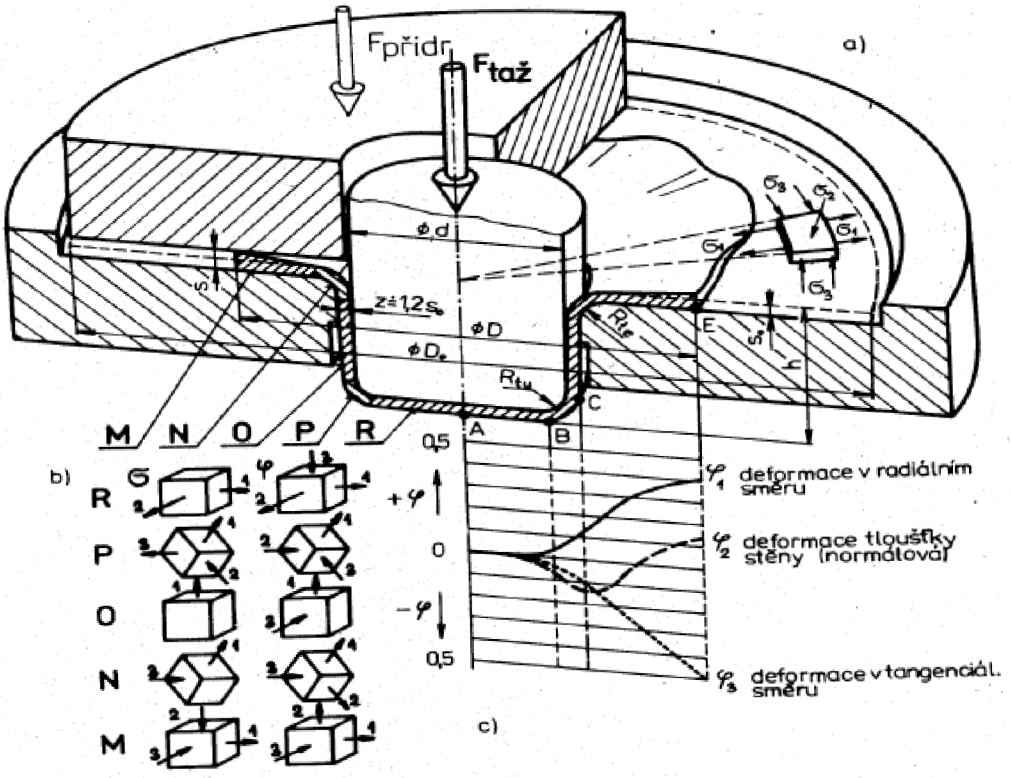


Obr. 2: Princip tažení plechu [1]

Skutečný trojosý napěťový a deformační stav při hlubokém tažení bez ztenčení stěny je při analýze často zjednodušován:

a) na dvojosý napěťový stav, kdy je napětí, které působí kolmo na tloušťku polotovaru zanedbáváno, protože nabývá jen velmi malých hodnot (1-3 MPa), ve srovnání s mezí kluzu

b) na dvojosý deformační stav, kdy je deformace ve směru tloušťky stěny zanedbávána [3].

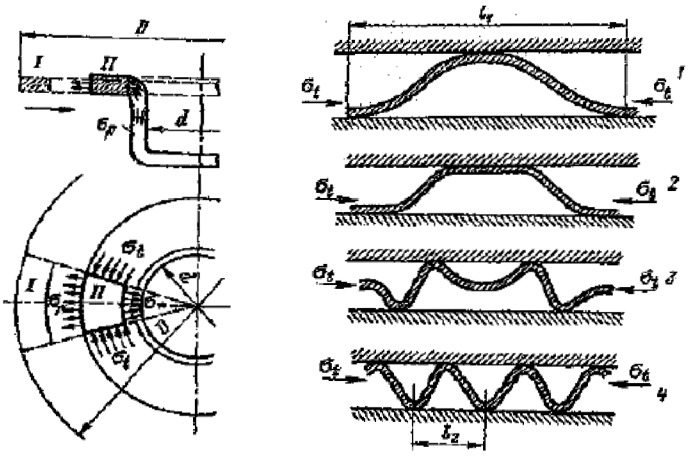


Obr. 3: Napěťový a deformační stav při hlubokém tažení bez ztenčení stěny [3]

Podle typu normy ČSN 22 6001 rozdělujeme tažení na:

- jednoduché tažení
- tažení se ztenčením stěny
- zpětné tažení
- žlábkování
- rozšiřování
- zužování
- …..

Jak již bylo řečeno, základním polotovarem je kruhový přístřih. Působením nástroje vzniká daný výtažek. Při tažení tenkého plechu vznikají přehyby na horní části materiálu [3].



Obr. 4: Tvoření vln [3]

Dalším nebezpečím při tažení je utržení dna výtažku, které nastane v případě, že se zvýší odpor. Jedná se jak o vnitřní odpor materiálu, tak i vnější odpory, jako je třecí odpor. Z tohoto důvodu se k nástroji přidává přidržovač [3].

3.1.1.1 Určení velikosti přístřihu

Jednou z nejdůležitějších podmínek k optimálnímu tažení je určení velikosti přístřihu. Přístřih se určí z rovnosti ploch polotovaru a hotové součásti. Podmínkou je stálost tloušťky stěny. Pokud se jedná o jednoduché rotační výtažky, rozloží se na jednotlivé úseky (rovinné plochy, zaoblení) a vypočítá se jejich plocha. Pokud se jedná o složitější rotační výtažky, které se nedají rozložit na jednoduché jednotlivé plochy, používá se pro výpočet plochy Guldynova věta.

$$R^2 = L \cdot d_m \qquad [1]$$

kde

$$d_m = 2 \cdot r_m \qquad [1]$$

kde

$$r_m = \frac{\sum L_i \cdot r_i}{L} \qquad [1]$$

Pokud se jedná o nerotační součásti, používají se kromě početních metod i metody grafické. Zásadou je, že plocha přístřihu je rovna s plochou výtažku s přídavkem na odstřižení [1].

3.1.2 Víceoperační tažení

Počet operací vyplývá ze stupně deformace ε. Ten je vyjádřen poměrem přesunutého objemu k objemu deformovanému. V případě velké deformace je nebezpečí vzniku vln a přeloženin. To se odstraňuje pomocí přidržovače, kde se podle vzorce pro poměrné tloušťky materiálu t / D a poměrných velikostí přemístěného objemu V_p / V_d určí, zda je potřebný přidržovač.

Podle tabulky lze zjistit, do jaké hloubky a o jakém průměru lze táhnout výtažek na jeden tah, aniž by došlo k porušení součásti. Pokud se výpočtem nedostaneme na danou hodnotu výrobku, je nutno táhnout více tahy. Zde se objevuje součinitel m, což je součinitel tažení, který určuje nejmenší možný poměr průměru výtažku k průměru přístřihu v první fázi tažení [1].

Tab. 2: Mezní hodnoty tažení s přidržovačem a bez přidržovače [1]

Způsoby tažení	Pro 1. tah		Pro 2. tah		Poznámka
	$\frac{t}{D_p}$	$\varepsilon = \frac{D_p - d}{D_p + d}$	$\frac{t}{D_p}$	ε	d – průměr výtažku
S přidržovačem	<0.015	≤0.6	<0.01	≤0.8	D – průměr přístřihu
Bez přidržovače	>0,02	>0.6	>0,05	>0.8	t – tloušťka plechu

<u>3.1.2.1 Součinitel tažení m</u>

1. operace $m_1 = \frac{d_1}{D_p}$ [1]

2. operace $m_2 = \frac{d_2}{d_1}$ [1]

3. operace ……..

Celkový součinitel se pak vypočítá vzájemným vynásobením všech součinitelů.

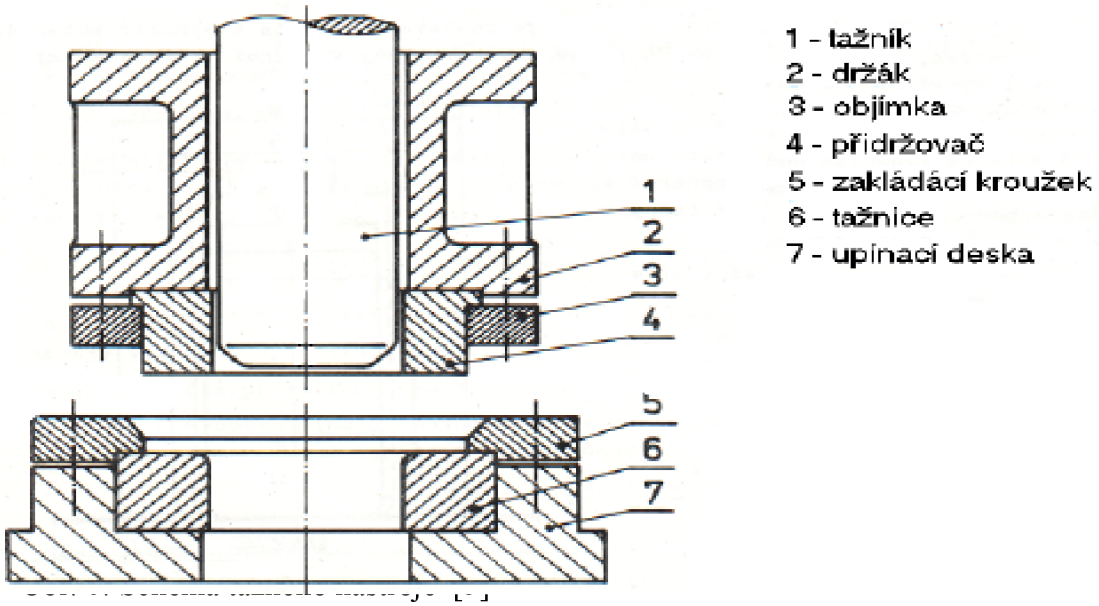
$$m = m_1 \cdot m_2 \ldots\ldots m_n \quad [1]$$

Pro jednotlivé materiály a tvary výtažků má součinitel tažení jinou hodnotu.

3.1.3 Tažný nástroj

Nástroj se skládá:

- tažník
- tažnice
- přidržovač



Mezi tažnicí a tažníkem je tažná mezera ozn. Z = 1,2 t, kde t je tloušťka plechu. Tato mezera je důležitá pro správný průběh tažení.

Dalším důležitým bodem je geometrie funkčních částí tažníku a tažnice. Jedná se o poloměr zaoblení. Ten má vliv na velikost napětí v materiálu, tažné síly a tvoření vlny.

$$R = 0.8 \cdot (D_p - d) \cdot t \qquad [1]$$

V praxi je rozmezí (6 – 10)t. Výška tažníku by měla být co nejmenší.

Při tažení vznikají velké třecí síly, proto je kladen velký důraz na mazání během operace. Mazání musí splňovat kriteria jako například:

- vytvářet pevnou nevysychající vrstvu odolávající velkým tlakům
- dobře přilnout a vytvořit rovnoměrnou vrstvu
- snadná odstranitelnost z povrchu součásti
- nepoškozovat mechanicky a chemicky vrstvu jak nástroje, tak výtažku
- ekologické

Vzorec pro výpočet nutnosti přidržovače:

$$k_p = 50 \cdot (1.9 - \frac{\sqrt{t}}{\sqrt[3]{D_p}}) \qquad [2]$$

$$k_p \geq \frac{100 \cdot d_1}{D_p}$$ je nutno použít přidržovač [2]

$$k_p \prec \frac{100 \cdot d_1}{D_p}$$ není nutné použít přidržovač [2]

Výpočet síly přidržovače:

$$F_p = S \cdot p_p \quad [N] \qquad [2]$$

S…….činná plocha přidržovače [m^2]

p……. specifický tlak přidržovače

měkká ocel…….$p_p = (1.8 – 2.8) \times 10^6$ Pa

hliník……. $p_p = (0.8 – 1.2) \times 10^6$ Pa

měď…… $p_p = (1,2 – 1.8) \times 10^6$ Pa

Tažná síla se během tažení mění. V první operaci je velká tak, jako by odpovídala hloubce tažení. Dále vzrůstá vlivem zpevnění materiálu až do bodu, kde sílá začne klesat.

Síla důležitá pro správnou volbu lisu [2]:

$$F_t := 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot t \cdot \left[\left(\gamma \cdot R_e \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_1}\right) + \frac{\mu \cdot F_p}{\pi \cdot r_v \cdot t} \right) e^{\mu \cdot \alpha} + \frac{R_m}{2 \cdot \frac{r_m}{t} + 1} \right] \qquad [N] \quad [2]$$

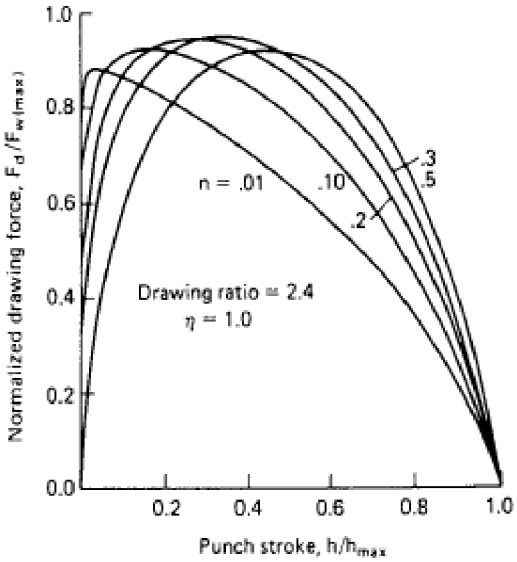
d……...průměr výtažku [m^2]

t……tloušťka plechu [m]

R_m……mez pevnosti [Pa]

n…….. koeficient závislý na součiniteli tažení m

Musí platit $F_{taž} < F_{krit}$, kde F_{krit} je síla, při níž dochází k utržení dna výtažku.



Obr. 5: Průběh tažné síly [3]

K tažné síle je potřeba přičíst hodnotu síly přidržovače.

Celková síla:

$$F_c = F_t + F_p \qquad [N] \qquad [1]$$

3.1.4 Výpočet součásti

3.1.4.1 Výpočet ploch

Součást se rozdělí na jednotlivé části a vypočítají se jejich obsahy.

$$S_1 := \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \qquad S_1 = 0.018m^2$$

$$S_2 := \pi \cdot \frac{D_1^2}{4} + \pi \cdot \frac{D_2^2}{4} + 2\pi R_1 \cdot v \qquad S_2 = 0.024m^2$$

$S_3 = 0.469m^2$

$S_4 = 0.023m^2$

$S_5 = 0.053m^2$

Obsah ploch byl vypočten a ověřen ve 3D modelu z programu SolidWorks 2008.

3.1.4.2 Celkový obsah

$S_c := S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5$

$S_c = 0.587m^2$

3.1.4.3 Výpočet průměru přístřihu

Z celkové plochy se vypočítá průměr přístřihu.

$S_c = \frac{\pi \cdot D_p^2}{4}$ vyjádřeno $\boxed{D_p := \sqrt{\frac{4 \cdot S_c}{\pi}}}$ $D_p = 864.735mm$ [2]

3.1.4.4 Poměrná tloušťka polotovaru [2]

Poměrnou tloušťkou se zjistí mezní hodnoty pro tažení.

$\frac{t}{D_p} \cdot 100 = 0.116$

Pro náš případ je použitelný sloupeček č.1 v rozmezí 0,1 – 0,3.

3.1.4.5 Výpočet počtu tahů [2]

Pro vypracování jsem vzal střední hodnotu průměru výtažku a použil jsem rozpětí pro případ výtažku s velkou přírubou.

Tab. 3: Hodnoty součinitelů tažení pro jednotlivé tahy [1]

Označení součinitele tažení	Poměrná tloušťka výstřižku $\frac{s}{D} \cdot 100$ (%)					
	0,1 až 0,3	0,3 až 0,6	0,6 až 1,0	1,0 až 1,5	1,5 až 2,0	nad 2,0
m_1	0,60-0,58	0,58-0,56	0,56-0,54	0,54-0,52	0,52-0,50	0,50-0,48
m_2	0,82-0,81	0,81-0,80	0,80-0,79	0,79-0,78	0,78-0,77	0,77-0,76
m_3	0,83-0,82	0,82-0,81	0,81-0,80	0,80-0,79	0,79-0,78	0,78-0,77
m_4	0,85-0,84	0,84-0,83	0,83-0,82	0,82-0,81	0,81-0,80	0,80-0,79
m_5, m_6	0,87-0,86	0,86-0,85	0,85-0,84	0,84-0,83	0,83-0,82	0,82-0,81
atd. při tažení s kalibrací	0,98-0,97	0,97-0,96	0,96-0,95	0,95-0,94	0,94-0,93	0,93-0,92

Pro výpočet jednotlivých tahů si určíme průměry jednotlivých kroků tak, aby hodnoty byly v mezi, která je v tabulce 3.

Výpočet 1. tahu [2]

$d_1 := 0.502m$

$m_0 := \frac{d_1}{D_p}$

$m_0 = 0.581$

Výpočet 2. tahu [2]

$d_2 := 0.40662 \cdot m$

$m_1 := \frac{d_2}{d_1}$

$m_1 = 0.81$

Výpočet 3. tahu [2]

$d_3 := 0.3334 \cdot m$

$m_2 := \frac{d_3}{d_2}$

$m_2 = 0.82$

Výpočet 4. tahu [2]

$d_4 := 0.274 \cdot m$

$m_3 := \frac{d_4}{d_3}$

$m_3 = 0.822$

Výpočet 5. tahu [2]

$d_5 := 0.2356 \cdot m$

$m_4 := \frac{d_5}{d_4}$

$m_4 = 0.86$

Výpočet 6. tahu [2]

$d_6 := 0.20262 \cdot m$

$m_5 := \frac{d_6}{d_5}$

$m_5 = 0.86$

Po výpočtu všech mezních hodnot, které jsou v daném rozmezí pro operace, se vypočítá tažná síla.

3.1.4.6 Výpočet tažné síly [2]

$$F_t := 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot t \cdot \left[\left(\gamma \cdot R_e \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_1}\right) + \frac{\mu \cdot F_p}{\pi \cdot r_v \cdot t} \right) e^{\mu \cdot \alpha} + \frac{R_m}{2 \cdot \frac{r_m}{t} + 1} \right]$$

$$F_t = 8.882 \times 10^5 \text{ N}$$

3.1.4.7 Výpočet síly přidržovače [2]

$$F_p := S \cdot p$$

$$F_p = 8.586 \times 10^5 \text{ N}$$

$p := 2.3 \cdot 10^6 \cdot \text{Pa}$ tlak přidržovače

$$S := \frac{\pi \cdot D_p^{\,2}}{4} - \frac{\pi \cdot (d_1 + 2 \cdot t + 2 \cdot r_m)^2}{4}$$ účinná plocha přidržovače

3.1.4.8 Síla dalších tahů [2]

síla pro 2. tah

$$F_{t2} := 2\pi d_2 \cdot \left(1.2 - \frac{d_2}{d_1}\right) \cdot t \cdot R_m$$

$$F_{t2} = 3.587 \times 10^5 \text{ N}$$

síla pro 3. tah [2]

$$F_{t3} := 2\pi d_3 \cdot \left(1.2 - \frac{d_3}{d_2}\right) \cdot t \cdot R_m$$

$$F_{t3} = 2.866 \times 10^5 \text{ N}$$

síla pro 4. tah [2]

$$F_{t4} := 2\pi d_4 \cdot \left(1.2 - \frac{d_4}{d_3}\right) \cdot t \cdot R_m$$

$$F_{t4} = 2.344 \times 10^5 \text{ N}$$

Jak je patrné, tak se síla se zvyšujícím tahem snižuje. Proto největší síla je při prvním tahu.

3.2 Kovotlačení

Operace vhodná pro kruhové a eliptické výtažky. Používá se pro kusovou nebo malosériovou výrobu. Lze zhotovovat i složitější výrobky.

Strojem jsou kovotlačitelské soustruhy, kde se do sklíčidla připevní šablona, která je negativem daného výrobku.

Technologií tlačení lze provádět např. tyto technologické operace: obrubování, lemování, rozšiřování, zužování, žlábkování, osazování u okraje nebo v plášti tvarovou plochou konvexně nebo konkávně.

Technologii kovotlačení můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin:

- klasické tlačení bez ztenčení stěny výtažku - zahrnuje tváření rotujícího polotovaru s prostorovou uzavřenou plochou zpravidla tvaru nádoby s vydutým či vystouplým povrchem bez redukce tloušťky stěny
- tlačení s redukcí tloušťky stěny (se ztenčením stěny) - tzv. smykové tlačení plechu, při kterém na rozdíl od prostého tlačení dochází k záměrnému ztenčení stěny výtlačku, přičemž původní tloušťku výchozího polotovaru má dno výrobku [5].

Technologie tlačení bez ztenčení stěny je technologie, při níž konečná tloušťka stěny tvářené nádoby zůstává stejná s výchozí tloušťkou polotovaru.

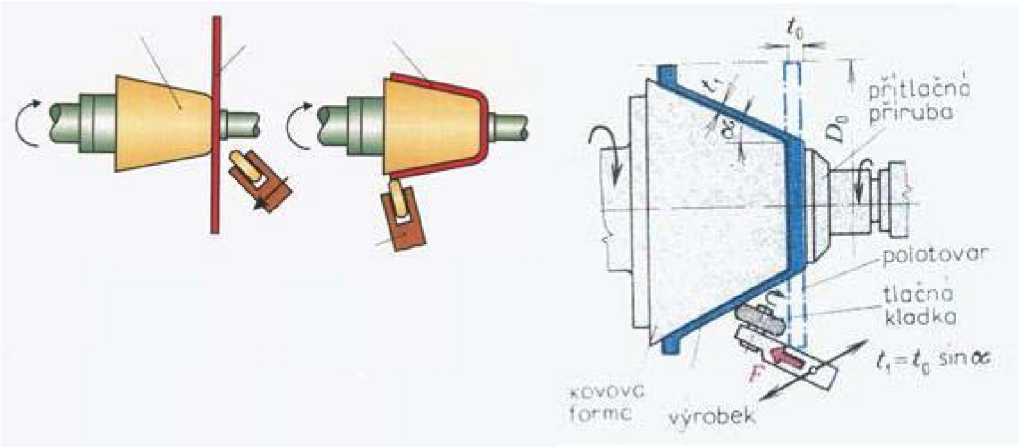
Technologie tlačení se ztenčením stěny je technologie již progresivnější, při níž tloušťka stěny konečného výrobku závisí na úhlu tvořící křivky v místě kontaktu tvářecí kladky. Výchozí polotovar má několikanásobně větší tloušťku, než je tloušťka stěny hotové rotační součásti. Technologie tlačení se ztenčením stěny přináší i vysokou úsporu materiálu. Kvalita povrchu vnitřních tvarů prakticky kopíruje parametry struktury povrchu použitého trnu. Struktura povrchu vnějších tvarů součásti je dána geometrií tvaru a povrchu použité kladky a technologickými parametry. Výchozí polotovar (rondel) pro tuto technologii nemusí mít vždy kruhový tvar. Je možno vycházet ze čtvercového přístřihu od nůžek, svařeného polotovaru, trubky, předlisovaného kalíšku atd. [5].

3.2.1 Přednosti a nevýhody rotačního tlačení

K všeobecným výhodám výrobního způsobu rotačního tlačení na hydraulických kovotlačitelských soustruzích především patří:

- nízké náklady na výrobu nástrojů, které jsou jednoduché a do značné míry univerzální
- krátké seřizovací časy (již z toho důvodu se vyplatí použít uvedenou technologii k výrobě malého počtu kusů nebo dokonce ke zhotovení jednoho kusu)
- možnost automatizace procesu při malých i velkých počtech kusů (tj. pro kusové i sériové výroby)
- velmi dobré možnosti zhotovení rozměrnějších součástí, např. o průměru 3600 mm a tloušťce 4 mm
- možnost zhotovení součástí s vysokou přesností (± 0,05 mm), nízkými výrobními tolerancemi a velmi jakostním povrchem
- úspora materiálu při výrobě kuželových tvarů speciálním způsobem tlačení
- úspora materiálu při použití rotačního tlačení součástí válcovitého tvaru, při kterém dochází ke ztenčení stěny plechu
- technologie rotačního tlačení umožňuje tvářet nejen hlubokotažné oceli, ale také nerezové oceli, žáruvzdorné oceli, ferochrom, titan a jeho slitiny, oceli s vyšší pevností, ale i barevné kovy.

K nevýhodám patří především relativně nižší produktivita práce ve srovnání s některými technologiemi hlubokého tažení [5].



Obr. 6: Princip kovotlačení [5]

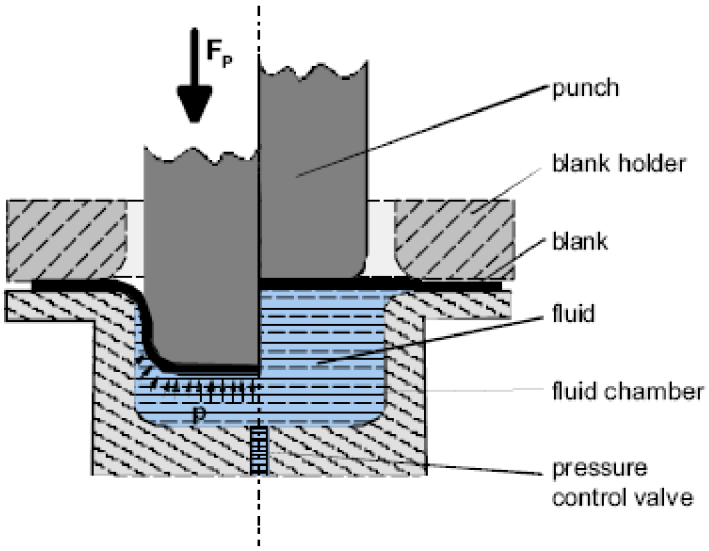
3.3 Hydromechanické tažení

Tato metoda patří mezi nekonvenční technologie tváření plechu.

3.3.1 Charakteristika

V konvenčním procesu hlubokého tažení je výstřižek tvarován do duté části pomocí tažníku, tažnice a přidržovače. Hydromechanický proces hlubokého tažení je specifická technologie hlubokého tažení. Při hydromechanickém hlubokém tažení je tažnice nahrazena kapalinou. Tlak kapaliny může být řízen. Tento proces je výhodný při výrobě komplexních dílců, protože se ušetří několik operací, mohou být taženy i hlubší součásti a může být dosaženo vyššího poměrného prodloužení. Lze vyrábět jak duté rotační součásti, tak i nerotační. Dále je možné vyrábět hlubší válcové součásti na jednu operaci. U tvarově složitějších součástí nastává výrazné snížení počtu operací. Při hydromechanickém procesu hlubokého tažení je třeba mít pouze přidržovač a tažník. Tedy výrobní náklady na nástroj pro hluboké tažení součástí s konečnou geometrií mohou být nižší ve srovnání s konvenčními nástroji pro hluboké tažení.

Při hydromechanickém procesu hlubokého tažení nebude přístřih tažen do tažnice jako při konvenčním procesu hlubokého tažení, ale místo toho je tlačen do kapalinou naplněné komory [1,4].



blank – výstřižek
fluid – kapalina
fluid chamber – komora s kapalinou
pressure control valve – ventil řídící tlak

Obr. 7: Nástroj pro hydromechanického tažení [4]

Tlak v komoře s kapalinou se zvyšuje, když se razník ponořuje, což způsobuje, že se plech pohybuje proti tažníku.

U hlubokých válcových součástí vyráběných hydromechanickým hlubokým tažením je ztenčení stěny součásti nižší. Toto nižší ztenčení stěny z důvodu zvýšeného tření mezi tažníkem a plechem je výsledkem toho, že kapalina tlačí na plech ve směru normály. Navíc tření, které existuje u konvenčního procesu hlubokého tažení v místě mezi plechem a hranou matrice, je nižší. Následkem toho je nižší radiální protažení. Tím se dosáhne vyššího mezního tažného poměru. Proto je možné při jedné operaci vyrobit obdélníkové součásti s ostrými hranami z tenkých plechů. Dokonce v oblastech, kde se u tažených součástí výjimečně vyskytne vysoké napětí, neobjeví se žádné praskliny, protože tlak kapaliny přitlačuje plech na razník [1,4].

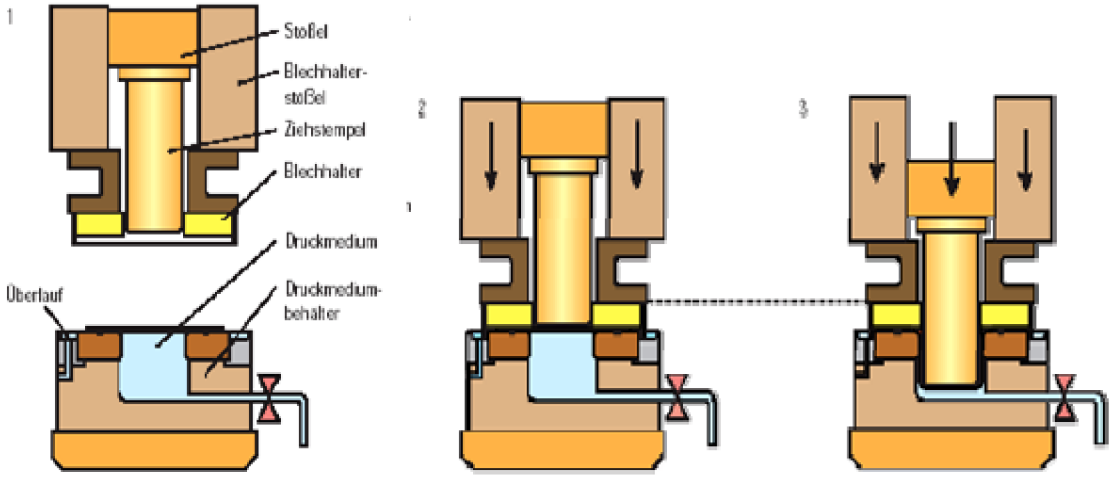
3.3.2 Přesnost výtažků

Přesnost hodnotíme dle válcovitosti. Hydromechanickým tažením lze dosáhnout velké přesnosti, a to IT 7, při optimálních hodnotách. Přesnost u klasického tažení se pohybuje okolo IT 14.

3.3.3 Princip

Komora s kapalinou je upevněna na základně. Vtlačením razníku do kapaliny se vyvolá tlak v komoře s kapalinou a současně účinné stlačení kapaliny. Tlak v kapalinové komoře bude řízen nastavením výpustě pro kapalinu. Komora s kapalinou bude utěsněna proti okolí přírubou pracovního kusu a zatížením přidržovače výstřižku.

Síla v přidržovači bude vyvozena pomocí válce prstencového tvaru pístu, který je upevněn na beranidle lisu. Hydraulický okruh pístového válce je zcela oddělen od hydraulického okruhu ohřívané kapaliny. Proto může být použit k ovládání pístového válce konvenční hydraulický olej. Při pohybu beranidla bude pístový válec tlačen společně, tedy vyvodí pomocí hydrostatického tlaku sílu v přidržovači. Síla v přidržovači bude řízena ventilem, který ovládá výpusť pro hydraulický olej. Hydraulický tlak, který má vyplnit válec pístu před lisováním, bude vyvozen externím hydraulickým agregátem [4].



Obr. 8: Princip hydromechanického tažení [6]

3.3.4 Výhody a nevýhody

Výhody hydromechanického tažení jsou:

- nízký součinitel tažení (m = 0,3-0.4)
- možnost tažení složitých výtažků na méně tahů než u konvečního tažení (kuželové, parabolické, s nerovnou přírubou, s otvorem ve dně, s šikmým a tvarovaným dnem)
- tažení hlubokých výtažků
- malá změna tloušťky stěny (2-3%)
- možnost táhnout povrchově upravené plechy (nedochází k poškození)
- levnější nástroj pro malé série výtažků

Nevýhody:

- jen výtažky s přírubou
- vysoký přidržovací tlak (kvůli těsnění)
- nutnost používat tlakové hydraulické prvky
- nižší produktivita

3.3.5 Základní výpočty a parametry

Stanovení výpočtu a parametrů pro proces tažení. Kromě standardních parametrů jako při konvenčním tažení, jako jsou přidržovací síla, tažné vůle a tažná síla, je zde parametr tlaku kapaliny [2].

3.3.5.1 Tlak kapaliny

Tlak závisí na tloušťce a jakosti polotovaru. Pokud se nejedná o válcovou součást, ale o kuželové, parabolické výtažky, mění se mezera mezi tažníkem a tažnicí a tím se mění i tlak kapaliny. Doporučený tlak je od 25 – 70 MPa [2].

3.3.5.2 Tažná síla - F_t

Síla se při hydromechanickém tažení stanovuje obvykle pouze pro kontrolu lisu.

$$F = F_{kt} + p_m \cdot S \qquad \text{[MN]} \qquad [2]$$

3.3.5.3 Přidržovací síla - F_p

Přidržovací síla je ovlivněna tlakem kapaliny. Pro ideální průběh procesu je požadována plynulá změna přítlačné síly v závislosti na změně tlaku v komoře. Přidržovací síla musí zabránit zvlnění příruby v malých vlnách nebo porušení materiálu [2].

$$p_p = 8 - 12 \text{ MPa}$$

3.3.5.4 Tažná vůle – z [2]

Je z nejvýznamnějších parametrů procesu, protože při tažení musí vytvořit protivlnu z tvářecího materiálu mezi tažníkem a přidržovačem.

1 mm	z = 4 - 6mm
2 mm	z = 8 - 14mm

3.3.5.5 Geometrické charakteristiky [2,4]

- Mezera mezi tažníkem a přidržovačem z_1:

  0.5 – 14mm dle tloušťky materiálu

- Zaoblení přidržovače R_1:

  1 – 5 mm

- Zaoblení tažnice - r_m:

  hlavní geometrický parametr

  4 – 12mm

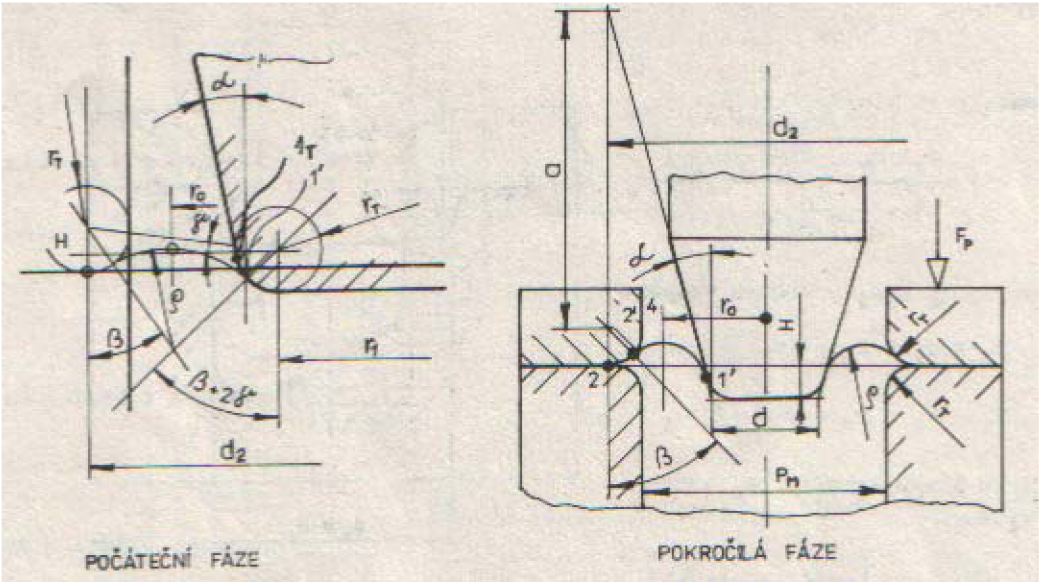
- Zaoblení tažníku – r

  nutno dodržet, aby nedošlo k prostřižení dna v prvních fázích

  1mm .....r_{min} = 3mm

  2mm..... r_{min} = 4mm

3.3.6 Výpočet hydromechanického tažení [2]



Obr. 9: Důležité rozměry pro výpočet [2]

Z důvodu tvaru dané součásti jsem tvar nahradil kuželem.

Princip spočívá v tom, že si zvolíme poloměr anuloidu ρ a při různé hloubce vniku a různém poloměru ρ počítáme dané napětí. Napětí musí být vždy menší než je mez pevnosti R_m. Anuloid je vždy tečný k tažnici a tažníku, tudíž je pouze jedna varianta. Z důvodu

výpočtu jsem nevolil grafickou formu zobrazení a změření jednotlivých hodnot potřebných pro výpočet, ale zvolil jsem úhel β na tažnici, kde pak pomocí výpočtů jsem došel k přesné hodnotě ρ. Následují výpočty potřebného tlaku kapaliny.

Jedním z nejdůležitějších vzorců je výpočet radiálního napětí σ_{r1} na tažníku. Zde je jedno z nejkritičtějších míst v tažení. V tomto bodě dochází ke styku materiálu a tažníku a je zde tahové napětí, které může porušit materiál [2].

3.3.6.1 Postup tažení při hloubce vniku 1 mm a při úhlu sklonu β = 1° [2]

Jak již bylo řečeno, nahradil jsem eliptický tvar kónusem s úhlem $\alpha_1 = 25°$.

$$\alpha_1 := 25$$

$$\alpha_{1t} := \frac{\pi \cdot \alpha_1}{180}$$

Použité hodnoty:

$r_T := 50mm$	Poloměr zaoblení tažníku
$r_1 := 75.29mm$	Poloměr od tažníku ke středu zaoblení tažníku
$H := 1mm$	Hloubka vniku
$d_t := 0.518m$	Průměr tažnice
$r_k := \frac{d_t}{2}$	Poloměr tažnic e
$R_1 := 50mm$	Poloměr zaoblení tažníku
$t := 1mm$	Tloušťka materiálu
$\mu := 0.135$	Koeficinet
$R_e := 240 \cdot 10^6 \cdot MPa$	Mez kluzu
$R_m := 360 \cdot 10^6 \cdot MPa$	Mez pevnosti
$p := 4 \cdot 10^5 \cdot Pa$	Tlak přidržovače

Pomocná hodnota pro další výpočet:

$$a := (r_k - r_1 + r_T) \cdot \frac{1}{\tan(\alpha_{1t})} - r_T - H$$

$$a = 0.45m$$

Počáteční fáze tažení

Zde se vytváří spodní část výlisku v oblasti dna do kuželového pláště. Poloha mezního bodu l_T na výlisku je konstantní. V závislosti na úhlu β nebo tlaku kapaliny p_m je jí dosahováno v různé hloubce H. S rozdílnými tlaky se změní i parametry protivlny.

Poloměr protivlny σ_T:

$$\sigma_T := \frac{r_k + r_l - r_T}{\cos(\alpha_{1t}) + \sin(\beta_{1t})} - r_T$$

$$\sigma_T = 0.258\text{m}$$

Hloubka tažení H_T:

Mění se v závislosti na β

$$H_T := (\sigma_T + r_T) \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_{1t}\right) - \sin(\alpha_{1t}) \right)$$

$$H_T = 0.178\text{m}$$

Výpočet úhlu γ:

$$\gamma := \frac{x \cdot 180}{\pi}$$

$$\gamma = 0.245$$

Přepočet na radiány:

$$x := \frac{H}{r_k + r_T - r_l}$$

$$x = 4.279 \times 10^{-3}\ \text{rad}$$

Výpočet poloměru $r_{2'}$ a $r_{1'}$:

$$r_{2'} := r_k + r_T \cdot (1 - \sin(\beta_{1t}))$$

$$r_{2'} = 0.308\text{m}$$

$$r_{1'} := r_l + r_T \cdot \sin(\beta_{1t} + 2 \cdot x)$$

$$r_{1'} = 0.077\text{m}$$

Poloměr protivlny v obecném místě počáteční fáze:

$$\rho := \frac{H}{2 \cdot \sin(\beta_{1t} + x) \cdot \sin(x)} - r_T$$

$$\rho = 5.328\text{m}$$

Poloměr r_0 na vrcholu protivlny:

$$r_0 := r_k + r_T - (\rho + r_T) \cdot \sin(\beta_{1t})$$

$$r_0 = 0.215\text{m}$$

Výpočet radiálního napětí $\sigma_{r2'}$:

Tento vztah pro výpočet napětí je pro fázi počáteční, tak i pro pokročilou fázi společný.

$$\sigma_{r2} := 1.1 \cdot R_e \cdot \ln\left(\frac{D_p}{d_{2t}}\right) + \frac{2 \cdot \mu \cdot F_p}{\pi \cdot D_p \cdot t}$$

$$\sigma_{r2} = 103.656\text{MPa}$$

musí být splněna podmínka

$\sigma_{r2} < R_m$ podmínka splněna

Radiální napětí v bodě $\sigma_{r2'}$:

$$\sigma_{r2'} := (\sigma_{r2}) \cdot e^{\mu \cdot \beta_{1t}}$$

$$\sigma_{r2'} = 103.901\text{MPa}$$

Výpočet tlaku kapaliny v tažné komoře:

$$p_m := \frac{2 \cdot \sigma_{r2'} \cdot t \cdot r_{2'} \cdot \sin(\beta_{1t})}{r_{2'}^2 - r_0^2}$$

$$p_m = 0.023\text{MPa}$$

Radiální napětí na tažníku:

$$\sigma_{r1} := \frac{p_m}{2 \cdot t} \cdot \frac{(r_0^2 - r_{1'}^2)}{r_{1'} \cdot \sin(\beta_{1t} + 2 \cdot x)}$$

$$\sigma_{r1} = 233.047\text{MPa}$$

musí být splněna podmínka

$\sigma_{r1} < R_m$ podmínka splněna

Jak je patrné z výpočtů, tak tlak na vytvoření poloměru ρ není příliš veliký. Podmínky jsou také všechny splněny.

Pro porovnání je nyní ukázán výpočet, kde je poloměr protivlny větší. Opět jsem zde poloměr protivlny vypočítal ze zvoleného úhlu β = 45°.

3.3.6.2 Postup tažení při hloubce vniku 1 mm a při úhlu sklonu β = 45° [2]

Pomocná hodnota pro další výpočet:

$$a := (r_k - r_1 + r_T) \cdot \frac{1}{\tan(\alpha_{1t})} - r_T - H$$

$$a = 0.45\text{m}$$

Poloměr protivlny σ_T:

$$\sigma_T := \frac{r_k + r_1 - r_T}{\cos(\alpha_{1t}) + \sin(\beta_{1t})} - r_T$$

$$\sigma_T = 0.126\text{m}$$

Hloubka tažení H_T:

Mění se v závislosti na β

$$H_T := (\sigma_T + r_T) \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_{1t}\right) - \sin(\alpha_{1t}) \right)$$

$$H_T = 0.05\text{m}$$

Výpočet úhlu γ:

$$\gamma := \frac{x \cdot 180}{\pi}$$

$$\gamma = 0.245$$

Přepočet na radiány

$$x := \frac{H}{r_k + r_T - r_1}$$

$$x = 4.279 \times 10^{-3}\ \text{rad}$$

Výpočet poloměru $r_{2'}$ a $r_{1'}$:

$r_{2'} := r_k + r_T \cdot (1 - \sin(\beta_{1t}))$

$r_{2'} = 0.274\text{m}$

$r_{1'} := r_1 + r_T \cdot \sin(\beta_{1t} + 2 \cdot x)$

$r_{1'} = 0.111\text{m}$

Poloměr protivlny v obecném místě počáteční fáze:

$$\rho := \frac{H}{2 \cdot \sin(\beta_{1t} + x) \cdot \sin(x)} - r_T$$

$\rho = 0.115\text{m}$

Poloměr r_0 na vrcholu protivlny:

$r_0 := r_k + r_T - (\rho + r_T) \cdot \sin(\beta_{1t})$

$r_0 = 0.193\text{m}$

Výpočet radiálního napětí $\sigma_{r2'}$:

Tento vztah pro výpočet napětí je pro fázi počáteční, tak i pro pokročilou fázi společný.

$$\sigma_{r2} := 1.1 \cdot R_e \cdot \ln\left(\frac{D_p}{d_{2t}}\right) + \frac{2 \cdot \mu \cdot F_p}{\pi \cdot D_p \cdot t}$$

$\sigma_{r2} = 103.656\text{MPa}$

musí být splněna podmínka

$\sigma_{r2} < R_m$ podmínka splněna

Radiální napětí v bodě $\sigma r2'$:

$\sigma_{r2'} := (\sigma_{r2}) \cdot e^{\mu \cdot \beta_{1t}}$

$\sigma_{r2'} = 115.251\text{MPa}$

Výpočet tlaku kapaliny v tažné komoře:

$$p_m := \frac{2 \cdot \sigma_{r2'} \cdot t \cdot r_{2'} \cdot \sin(\beta_{1t})}{r_{2'}^2 - r_0^2}$$

$p_m = 1.181\text{MPa}$

Radiální napětí na tažníku:

$$\sigma_{r1} := \frac{p_m}{2 \cdot t} \cdot \frac{\left(r_0^{\,2} - r_{1'}^{\,2}\right)}{r_{1'} \cdot \sin\left(\beta_{1t} + 2 \cdot x\right)}$$

$$\sigma_{r1} = 185.079\text{MPa}$$

musí být splněna podmínka

$\sigma_{r1} < R_m$ podmínka splněna

Jak je patrné z obou výpočtů, se zmenšujícím se poloměrem protivlny ρ se zvyšuje tlak kapaliny v komoře a zvětšuje se radiální napětí na tažníku. Při jeho překročení nad mez pevnosti dojde k porušení materiálu.

3.3.6.3 Postup tažení při hloubce vniku 200mm a při úhlu sklonu β = 50° [2]

Pokročilé tažení

Tato fáze nastává po dosažení mezního bodu 1_T, kdy přechod ze dna do kuželového pláště je vytvořen a formuje se vlastní kuželový plášť výtažku.

$r_T := 50\text{mm}$	Poloměr zaoblení tažníku
$r_1 := 75.29\text{mm}$	Poloměr od tažníku ke středu zaoblení tažníku
$H := 200\text{mm}$	Hloubka vniku
$d_t := 0.518\text{m}$	Průměr tažnice
$r_k := \frac{d_t}{2}$	Poloměr tažnic e
$R_1 := 50\text{mm}$	Poloměr zaoblení tažníku
$t := 1\text{mm}$	Tloušťka materiálu
$\mu := 0.135$	Koeficinet
$R_e := 240 \cdot 10^6 \cdot \text{MPa}$	Mez kluzu
$R_m := 360 \cdot 10^6 \cdot \text{MPa}$	Mez pevnosti
$p := 4 \cdot 10^5 \cdot \text{Pa}$	Tlak přidržovače

Pomocná hodnota pro další výpočet:

$$a := (r_k - r_1 + r_T) \cdot \frac{1}{\tan(\alpha_{1t})} - r_T - H$$

$$a = 0.251\text{m}$$

Poloměr protivlny σ_T:

$$\sigma_T := \frac{r_k + r_1 - r_T}{\cos(\alpha_{1t}) + \sin(\beta_{1t})} - r_T$$

$$\sigma_T = 0.12\text{m}$$

Poloměr protivlny v obecném místě pokročilé fáze:

$$\rho := \left[\frac{\left(a + \frac{r_T}{\cos(\beta_{1t})}\right) \cdot \sin(\alpha_{1t})}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta_{1t} - \alpha_{1t}\right)} - r_T \cdot \tan(\beta_{1t})\right] \cdot \tan\left[\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \beta_{1t} + \alpha_{1t}\right)\right]$$

$$\rho = 0.06\text{m}$$

Výpočet radiálního napětí $\sigma_{r2'}$:

$$\sigma_{r2} := 1.1 \cdot R_e \cdot \ln\left(\frac{D_p}{d_{2t}}\right) + \frac{2 \cdot \mu \cdot F_p}{\pi \cdot D_p \cdot t}$$

$$\sigma_{r2} = 103.656\text{MPa}$$

$$\sigma_{r2'} := (\sigma_{r2}) \cdot e^{\mu \cdot \beta_{1t}}$$

$$\sigma_{r2'} = 116.617\text{MPa}$$

$\sigma_{r2} < R_m$ podmínka splněna

Výpočet tlaku kapaliny v tažné komoře:

$$p_m := \frac{\sigma_{r2'} \cdot 2 \cdot t \cdot \sin(\beta_{1t}) \cdot \left[r_k + r_T \cdot (1 - \sin(\beta_{1t}))\right]}{\left[r_k + r_T \cdot (1 - \sin(\beta_{1t}))\right]^2 - \left[r_k + r_T - (r_T + \rho) \cdot \sin(\beta_{1t})\right]^2}$$

$$p_m = 2.131\text{MPa}$$

Radiální napětí na tažníku:

$$\sigma_{r1} := \frac{p_m \cdot \rho}{2.t} \cdot \frac{2 \cdot \left[r_k + r_T - \left(r_T + \rho\right) \cdot \sin\left(\beta_{1t}\right) \right] - \rho \cdot \cos\left(\alpha_{1t}\right)}{r_k + r_T - \left(r_T + \rho\right) \cdot \sin\left(\beta_{1t}\right) - \rho \cdot \cos\left(\alpha_{1t}\right)}$$

$\sigma_{r1} = 81.772\text{MPa}$

Výpočet poloměrů r_O, $r_{1'}$, $r_{2'}$:

$r_0 := r_k + r_T - \left(\rho + r_T\right) \cdot \sin\left(\beta_{1t}\right)$

$r_0 = 0.225\text{m}$

$r_{2'} := r_k + r_T \cdot \left(1 - \sin\left(\beta_{1t}\right)\right)$

$r_{2'} = 0.271\text{m}$

$r_{1'} := r_0 - \rho \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{1t}\right)$

$r_{1'} = 0.171\text{m}$

3.3.6.4 Postup tažení při hloubce vniku 200 mm a při úhlu sklonu β = 89° [2]

Pomocná hodnota pro další výpočet:

$a := \left(r_k - r_1 + r_T\right) \cdot \frac{1}{\tan\left(\alpha_{1t}\right)} - r_T - H$

$a = 0.251\text{m}$

Poloměr protivlny σ_T:

$$\sigma_T := \frac{r_k + r_1 - r_T}{\cos\left(\alpha_{1t}\right) + \sin\left(\beta_{1t}\right)} - r_T$$

$\sigma_T = 0.099\text{m}$

Poloměr protivlny v obecném místě pokročilé fáze:

$$\rho := \left[\frac{\left(a + \frac{r_T}{\cos\left(\beta_{1t}\right)}\right) \cdot \sin\left(\alpha_{1t}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta_{1t} - \alpha_{1t}\right)} - r_T \cdot \tan\left(\beta_{1t}\right) \right] \cdot \tan\left[\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \beta_{1t} + \alpha_{1t}\right)\right]$$

$\rho = 0.032\text{m}$

Výpočet radiálního napětí $\sigma_{r2'}$:

$$\sigma_{r2} := 1.1 \cdot R_e \cdot \ln\left(\frac{D_p}{d_{2t}}\right) + \frac{2 \cdot \mu \cdot F_p}{\pi \cdot D_p \cdot t}$$

$\sigma_{r2} = 103.656\text{MPa}$

$$\sigma_{r2'} := (\sigma_{r2}) \cdot e^{\mu \cdot \beta_{1t}}$$

$\sigma_{r2'} = 116.617\text{MPa}$

$\sigma_{r2} < R_m$ podmínka splněna

Výpočet tlaku kapaliny v tažné komoře:

$$p_m := \frac{\sigma_{r2'} \cdot 2 \cdot t \cdot \sin(\beta_{1t}) \cdot \left[r_k + r_T \cdot (1 - \sin(\beta_{1t}))\right]}{\left[r_k + r_T \cdot (1 - \sin(\beta_{1t}))\right]^2 - \left[r_k + r_T - (r_T + \rho) \cdot \sin(\beta_{1t})\right]^2}$$

$p_m = 3.857\text{MPa}$

Radiální napětí na tažníku:

$$\sigma_{r1} := \frac{p_m \cdot \rho}{2.t} \cdot \frac{2 \cdot \left[r_k + r_T - (r_T + \rho) \cdot \sin(\beta_{1t})\right] - \rho \cdot \cos(\alpha_{1t})}{r_k + r_T - (r_T + \rho) \cdot \sin(\beta_{1t}) - \rho \cdot \cos(\alpha_{1t})}$$

$\sigma_{r1} = 40.887\text{MPa}$

Výpočet poloměrů r_O, $r_{1'}$, $r_{2'}$:

$$r_0 := r_k + r_T - (\rho + r_T) \cdot \sin(\beta_{1t})$$

$r_0 = 0.227\text{m}$

$$r_{2'} := r_k + r_T \cdot (1 - \sin(\beta_{1t}))$$

$r_{2'} = 0.259\text{m}$

$$r_{1'} := r_0 - \rho \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{1t}\right)$$

$r_{1'} = 0.198\text{m}$

4. Závěr

Z výpočtů je patrné, že pokud by se součást vyráběla klasickým způsobem hlubokého tažení, bylo by pro danou součást zapotřebí 6 tahů a jedna operace pro kalibraci. V případě, že by se součást táhla na mezní hodnoty, bylo by nebezpečí utržení dna a je nutné mezi operacemi vždy použít žíhání.

Hydromechanické tažení se liší od konvenčního tažení tím, že z důvodu tlaku kapaliny v komoře se zvyšuje výhodné tření mezi tažníkem a plechem a snižuje se nevýhodné tření mezi povrchem matrice a plechem. Kapalina tlačí na plech ve směru normály, což zlepšuje rozložení tlaku plechu na profilu tažníku. Proto lze táhnout hluboké výtažky pouze na jeden tah. Tření, které existuje u konvenčního procesu hlubokého tažení v místě mezi plechem a hranou tažníku, je nižší. Následkem toho je nižší radiální protažení. Tím se dosáhne vyššího mezního tažného poměru. Proces hydromechanického tažení překonává některá omezení konvenčního hlubokého tažení, a proto lze vyrábět hlubší výtažky s daleko stejnoměrnější tloušťkou stěny, vyšší rozměrovou přesností a lepší kvalitou povrchu. Poslední operace, kalibrace součásti, se nemusí uvažovat, protože se materiál díky tlaku kapaliny těsně obepíná kolem tažníku, a tudíž kopíruje tvar dané součásti.

Náklady na klasické víceoperační hluboké tažení jsou mnohem větší než pro tažení hydromechanické, protože je třeba vyrobit 6, respektive 7 tažných nástrojů z důvodu kalibrace součásti.

U hydromechanického tažení je pouze jeden nástroj. Při konstrukci nástroje jsou kladeny větší nároky na těsnost a na dobré antikorozní schopnosti.

Nástroj pro kovotlačení je z nástrojů nejlevnější.

Hodnocení sériovosti:

Pro kusovou výrobu se nejlépe hodí využít technologii kovotlačení, kde je zapotřebí pouze upravený soustruh (kovotlačitelský soustruh) a šablona pro vytlačení výtažku z přístřihu.

Pro hromadnou a velkosériovou výrobu je nejlépe použít hydromechanické tažení a postupné hluboké tažení. Produktivita a cena dané součásti hraje velkou a významnou úlohu. Při porovnání těchto dvou technologií nejlépe vychází hydromechanické tažení z důvodu počtu nástrojů a speciálního hydraulického lisu.

5. Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka / Symbol	Jednotka	Popis
α	$\pi/2$	
d	mm	průměr výtažku
d_1	mm	průměr z předchozího tahu
d_1-d_6	mm	průměr z předchozího tahu při 1. - 6. tahu
d_2	mm	průměr z předchozího tahu
d_m	mm	průměr těžiště obrysu výtažku
D_p	mm	průměr přístřihu
E	MPa	modul pružnosti
ε	--	stupeň deformace
F_c	N	celková tažná síla
F_p	N	síla přidržovače
F_t	N	tažná síla
F_{t2}-F_{t6}	N	síla při dalších tazích
γ	1,15	konstanta
IT	-	toleranční pole
k_p	--	nutnost přidržovače
L	mm	délka poloviny obrysu výtažku
m	--	celkový součinitel tažení
μ	0,3	koeficient
m_1	--	součinitel tažení pro 1. tah
m_2	--	součinitel tažení pro 2. tah
m_3	--	součinitel tažení pro 3. tah
m_4	--	součinitel tažení pro 4. tah
p	MPa	tlak přidržovače
p_p	MPa	tlak přidržovače
R	mm	poloměr přístřihu
r_1	mm	poloměr tažníku
R_e	MPa	mez kluzu
r_m	mm	poloměr těžiště obrysu výtažku
R_m	MPa	mez pevnosti
r_m	mm	poloměr zaoblení tažnice
rt	mm	poloměr zaoblení tažníku
r_v	mm	poloměr příruby
S	mm^2	činná plocha přidržovače
S_1-S_5	mm2	jednotlivé plochy součásti
Sc	m^2	celkový obsah výtažku
σ_D	MPa	deformační odpor
$\underline{\sigma_{dsk}}$	MPa	deformační odpor
σ_n	MPa	normálové napětí
$\underline{\sigma_P}$	MPa	přirozený přetvárný odpor

t	mm	tloušťka
V_d	mm^3	objem výtažku
V_p	mm^3	objem přístřihu
z	mm	tažná mezera
H	mm	hloubka vniku
rk	mm	poloměr tažnice
dt	mm	průměr tažnice
$\alpha 1$	°	úhel sklonu tažníku
α_{1t}	rad	úhel sklonu tažníku
$\beta 1$	°	úhel sklonu k tečně poloměru vlny ρ
$\beta 1t$	rad	úhel sklonu k tečně poloměru vlny ρ
a	mm	pomocná hodnota
σT	m	poloměr protivlny v bodě 1T
HT	m	hloubka tažení v bodě 1T
γ	rad	pomocný úhel
r2´	mm	pomocné poloměry pro výpočet
r1´	mm	pomocné poloměry pro výpočet
ρ	m	poloměr protivlny v obecném místě počáteční fáze
r0	m	poloměr na vrcholu protivlny
$\sigma r2$	MPa	radiální napětí v bodě r2
$\sigma r2'$	MPa	radiální napětí v bodě r2´
pm	MPa	tlak kapaliny v tažné komoře
$\sigma r1$	MPa	radiální napětí na tažníku

6. Použitá literatura

[1] DVOŘÁK, Milan, et al. *Technologie II*. 3. dopl. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004. 238 s. ISBN 80-214-2683-7.

[2] ŠPAČEK, Jindřich, ŽÁK, Ladislav. *Speciální technologie I a II : Návody do cvičení - část: plošné tváření*. 1. vyd. Brno : VUT Brno, 1991. 109 s. ISBN 80-214-0259-8.

[3] PETRUŽELKA, Jiří , BŘEZINA, Richard. *ÚVOD DO TVÁŘENÍ II*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2001. 115 s.

[4] GERRIT, Kurz. *Heated Hydro -Mechanical Deep Drawing of Magnesium Sheet Metal*. Institute for Metal Forming and Metal Forming Machine Tools, University of Hanover, Welfengarten 1A, 30167 Hanover, Germany, 2004. 5 s. Referát.

[5] MM Průmyslové spektrum [on – line]. Rotační tlačení plechu s povrchovou úpravou. 1.1.2001, roč. 2001, č. 7, s. 24. Dostupné z http://www.mmspektrum.com/clanek/rotacni-tlaceni-plechu-s-povrchovou-upravou

[6] XU, Yongchao, KANG, Dachang, ZHANG, Shihong. Investigation of SUS304 Stainless Steel with Warm Hydro-mechanical Deep Drawing. *J. Mater. Sci. Technol*. 2004, no. 20, s. 92-93.

[7] ŽELEZÁRNY Velký Šenov s.r.o. [online]. Poslední editace: 2007, [2009-06-05]. Dostupný z http://www.zelezarnyvs.cz/cs/index.php?page=jakosti_oceli

7. Seznam příloh

Příloha 1	Norma materiálu DC 01 (ČSN 411320, 1.0320)
Příloha 2	Výkres součásti
Příloha 3	Rozměrový náčrt prvního tahu