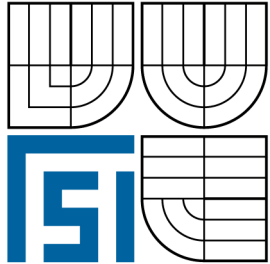




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## **NAPJATOSTNÍ ANALÝZA V NALISOVANÉM SPOJI**

**ANALYSE OF STATE OF STRESS IN PRESS AND SHRINK FITS**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Ing. MILAN DUDEK**

**VEDOUČÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Doc. Ing. JANA HORNÍKOVÁ, Ph.D.**

BRNO 2011

**ABSTRAKT**

Práce je zaměřena na stanovení přesahu při lisování v závislosti na mezním stavu pružnosti materiálu pomocí analytických metod Pružnosti a pevnosti. Vypočtené hodnoty jsou ve formě změněného technologického postupu uvedeny do výroby v přesnosti umožňující dostupné technologie. Je provedeno i stručné ekonomické zhodnocení změny technologického postupu.

**Klíčová slova**

Nalisovaný spoj, přesah, mez pružnosti materiálu

**ABSTRACT**

This thesis is focused on calculation of overlap in press fit depending on yield strength. There are used methods of analytic elasticity. The counted values are implemented into the technologic process as updated technologic specification. The practical values of overlap depend on exactness of available technology. The evaluation is done at the end of thesis (economic evaluation as well)

**Key words**

Press fit, overlap, elastic strength

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DUDEK, Milan. *Napjatostní analýza v nalisovaném spoji*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 36 s., 4 přílohy. Vedoucí práce doc. Ing. Jana Horníková, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Napjatostní analýza v nalisovaném spoji vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 22.5.2011

.....  
Milan Dudek

## **Poděkování**

Děkuji tímto doc. Ing. Janě Horníkové, Ph.D za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Dále děkuji Ing. Josefu Zapletalovi, prof. Ing. Miroslavu Piškovi, Csc., Ing. Evě Novotné, Ph.D., Paed IGIP a kolektivu pracovníků firmy WERAWERK spol s.r.o. za podněty a připomínky pro zpracování.

**OBSAH**

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah .....	7
1 ÚVOD .....	8
1.1 Nalisovaný spoj .....	8
1.2 Cíl práce .....	8
2 POPIS VÝROBKU A PROBLÉMU.....	9
2.1 Popis problému při výrobě.....	9
2.1.1 Vstupní materiál .....	10
4 POUŽITÝ MATERIÁL .....	11
5 TECHNOLOGICKÝ POSTUP .....	13
5.1 Stávající technologický postup .....	13
5.2 Navrhovaný technologický postup - vystružování.....	14
5.3 Navrhovaný technologický postup – selektivní montáž .....	14
6 STROJNÍ VYBAVENÍ .....	16
6.1 Hydraulický lis.....	16
6.2 Bruska .....	16
6.3 Vrtačka .....	17
7 VÝPOČTOVÁ ČÁST.....	18
7.1 Metoda výpočtu pro tenkostěnný kroužek (slabě zakřivený prut) .....	18
7.1.1 Výpočet pro tenkostěnný kroužek (slabě zakřivený prut) .....	20
7.2 Metoda výpočtu pro válcové těleso zatížené vnitřním tlakem.....	22
7.2.1 Výpočet pro válcové těleso zatížené vnitřním tlakem.....	26
7.2.2 Metoda výpočtu pro soustavu dvou válcových těles nasazených na sebe s přesahem (vnitřní těleso bez otvoru).....	28
8 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	31
8.1 Ekonomické zhodnocení .....	31
9 ZÁVĚR.....	33
Seznam použitých zdrojů.....	34
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	35
Seznam příloh.....	36

# **1 ÚVOD**

## **1.1 Nalisovaný spoj**

Pevné spojení dvou součástí kruhového průřezu se v technické praxi vyskytuje velmi často. Vzniká nalisováním válečku do trubky s přesahem. Rizikem pro využití této technologie představují vlastnosti použitých materiálů a hodnota zvoleného přesahu. Následkem použití materiálu s nevhodnými mechanickými vlastnostmi nebo lisování s přesahem, při kterém je překročen mezní stav pružnosti materiálu, je vznik trhlin.

## **1.2 Cíl práce**

Cílem práce je stanovit vhodný přesah pro lisování metodami analytické pružnosti a pevnosti v závislosti na mechanických vlastnostech použitého materiálu. Dále porovnání získaných výsledků a vyvození závěru ve formě návrhu změny technologického postupu a vyčíslení možných úspor.

## 2 POPIS VÝROBKU A PROBLÉMU

Řešený lisovaný spoj je součástí prodloužení pro kladivovou ráčnu. Prodloužení je opatřeno plastovou rukojetí, která je nalepena na ocelové trubce s povrchovou úpravou matný chrom nikl. Nalisovaný váleček je povrchově ošetřen vrstvou zinkofosfátu, je zušlechtěný na 56 + 2 HRC a opatřený nýtovaným kolíkem pro aretaci v ráčně. Vrub u trubky prodloužení je konstrukčně opodstatněný hloubkou pro zasunutí prodloužení do ráčny. Vrub je hranicí pro funkční spojení obou částí.

Výkres válečku trubky i sestavy je uveden v Příloze č.1, 2 a 3.

### 2.1 Popis problému při výrobě

Výše popsané spojení nalisováním se ve výrobě firmy používá jako zcela nová technologie. Velikost přesahu byla stanovena pouze na základě zkoušek zalisování na 100ks vzorků bez jakýchkoliv výpočtů nebo prověřování mechanických vlastností materiálu. Nebyla realizována ani zkouška pevnosti zalisování tzn. jakou silou je možné váleček vytáhnout.

Při zahájení sériové výroby se na hotových kusech začaly do 24 hodin tvořit trhliny, které se objevily po zalisování 9000 ks u 690 ks (7,6 %).

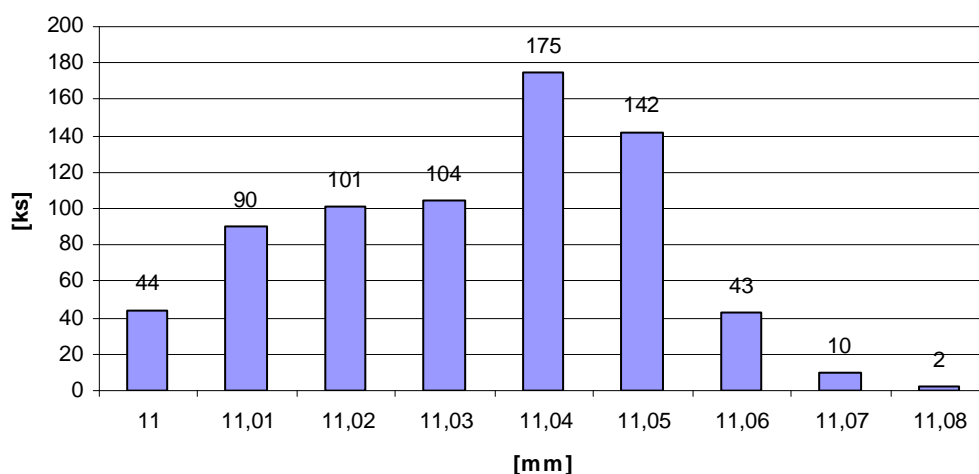


Obr. 2.1 Trhliny na trubce po zalisování válečku

### 2.1.1 Vstupní materiál

Váleček je vyráběn přímo ve firmě a zcela vyhovuje tolerancím dle výkresu.

Trubka se nakupuje v Číně v nezušlechtěném stavu bez povrchové úpravy. Pro lisování se má nejpodstatnější vnitřní průměr trubky pohybovat v rozmezí  $11 + 0,05$  mm. U měření dodaných trubek však bylo zjištěno, že hodnoty se pohybují v rozmezí  $11 + 0,08$  mm (po měření 711 ks). Vzhledem k časovému zpoždění a nákladnosti dopravy byly všechny trubky uvolněny pro další zpracování. V grafu na obrázku Obr. 2.2 je znázorněn histogram četností jednotlivých vnitřních průměrů u měřených trubek.



Obr. 2.2. Histogram četnosti naměřených vnitřních průměrů trubek

Po povrchové úpravě trubky se vnitřní průměr zmenší vlivem nanesení vrstvy chrom niklu o 0,03 mm. Následně se trubky naskladňují a čekají na další zpracování. Před lisováním se tedy vnitřní průměr trubek pohybuje v rozmezí 10,97 – 11,05 mm se stejným rozdělením četností jako v grafu na obrázku Obr. 2.2.

Trubky se netřídí do skupin podle velikosti vnitřního průměru a vnitřní průměr ani není vystružováním upraven na shodné hodnoty. Následkem takto velkého rozptylu hodnot dochází k lisování válečku se stejným vnějším průměrem do trubek s vnitřními průměry s rozdíly až 0,08 mm a iniciaci vzniku trhlin u extrémních případů.

Podrobný popis postupu pro stanovení průměru válečku broušením před zahájením lisování je uveden v kapitole 5.1.

## 4 POUŽITÝ MATERIÁL

Pro výrobu prodloužení je použita za tepla tažená trubka z oceli 4140 dle čínského značení. Tato ocel odpovídá svými vlastnostmi oceli 1.7225 – 42CrMo4 dle normy DIN EN 10083 případně oceli ČSN 15 142. Jedná se o ocel vhodnou pro tváření za studena, pro výrobu klikových hřídelí, čepů a ojníc. Složení oceli je uvedeno v tabulce Tab. 4.1

Tab.4.1 Chemické složení oceli 1.7225 [%]<sup>8</sup>

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,380	- max.	0,600	- max.	max.	0,900	- 0,150
0,450	0,400	0,900	0,035	0,035	1,200	0,300

Pro zjištění mechanických vlastností materiálu byla provedena tahová zkouška s následujícími výsledky (Obr. 4.2):

$$R_m = 704 - 766 \text{ MPa}$$

$$R_e = 649 - 699 \text{ MPa}$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

kde  $R_m$  je mez pevnosti v tahu

$R_e$  je mez kluzu

$E$  modul pružnosti v tahu

Vzhledem k charakteru práce, která je založena na výpočtových metodách analytické Pružnosti a pevnosti bude mez kluzu  $R_e$  v dalším textu značena jako  $\sigma_k$ . Pro další výpočty se hodnota  $\sigma_k$  bude brát 700 MPa.

Měření tvrdosti bylo provedeno třikrát na každém vzorku dle následujících metod:

- měření tvrdosti dle Rockwella

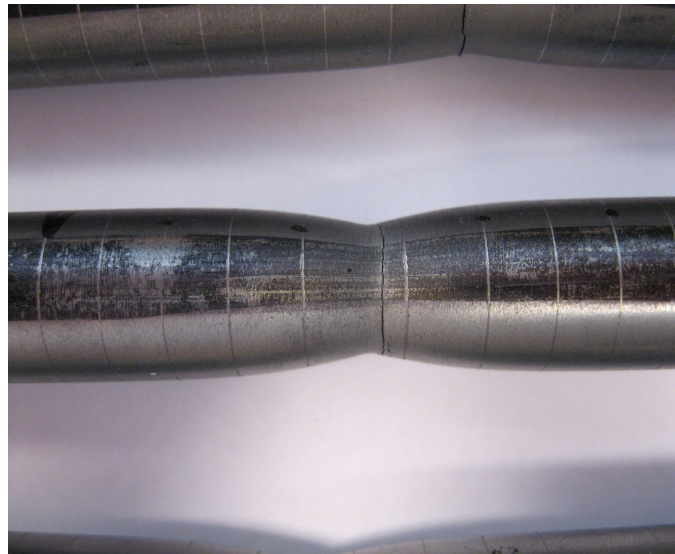
- měření tvrdosti dle Vickerse

Průměrná hodnota tvrdosti pro první metodu je 16,7 HRC z hodnot: (16,7 HRC; 16,5 HRC; 16,9 HRC)

Průměrná hodnota tvrdosti pro druhou metodu při zatížení HV10 je 237 z hodnot:

(236; 242; 233)

Závislost získaná tahovou zkouškou je znázorněna v grafu na obrázku Obr.4.2. Jako klíčové pro další postup je získání informace, že skutečné materiálové charakteristiky neodpovídají žádnému stavu dle materiálového listu oceli a změřené hodnoty jsou i nižší než by podle materiálového listu měly být. Materiálový list oceli je uveden v Příloze č.4.

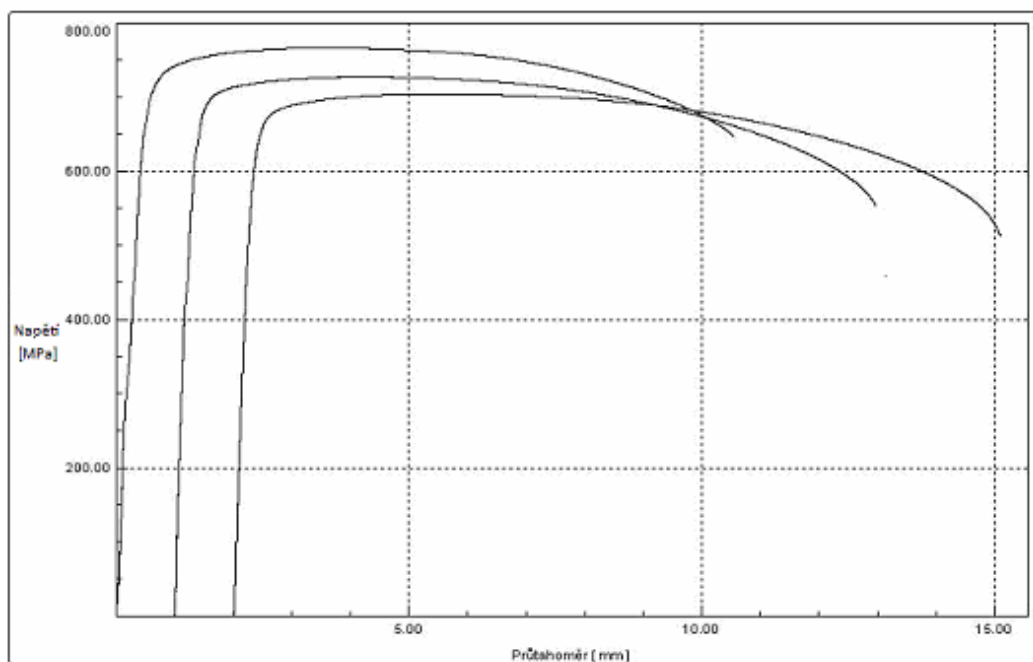


Obr. 4.1 Vzorek po provedení tahové zkoušky

Pro výrobu válečku je použita ocel 1.2243 – 61CrSiV5 dle normy DIN. Jedná se o ocel vhodnou rovněž pro tváření za studena, ruční nářadí, protahovací trny apod. Složení oceli je uvedeno v tabulce Tab. 4.2

Tab.4.2 Přísady v oceli 1.2243 [%]<sup>8</sup>

C	Si	Mn	Cr	V
0,6	0,9	0,8	1,1	0,1



Obr. 4.2 Průběh tahové zkoušky oceli 1.7225 u tří vzorků

## 5 TECHNOLOGICKÝ POSTUP

Pro přesah při lisování byla stanovena míra 0,02 mm, která nevychází z žádné normy, ale pouze ze zkoušek provedených před zahájením sériové výroby. Z důvodu vysoké zmetkovitosti při lisování bylo již v počátku výroby upuštěno od zušlechťování trubek.

V této kapitole je uveden stávající technologický postup společně s dvěma variantami navrhovaných změn pro snížení zmetkovitosti.

### 5.1 Stávající technologický postup

Stávající technologický postup je založen na předpokladu, že vnitřní průměr trubky po povrchové úpravě se pohybuje v rozmezí 10,97 mm až 11,05 mm tzn. i mimo toleranci. Zakázky do výroby se vydávají po 300 ks. Pro každou zakázku je provedeno měření vnitřního průměru u 20 ks trubek. Z výsledku měření jsou vyloučeny dvě maximální hodnoty a pro třetí nejvyšší hodnotu je stanovena míra pro broušení válečku na okružní brusce. Tzn. pokud je největší průměr 11,05 mm, druhý největší 11,04 mm a třetí největší 11,03 mm, brousí se na míru 11,03 + 0,02 mm. V praxi to znamená, že trubky s průměrem 11,05, 11,04 a 11,03 mm jsou lisovány bez přesahu a spojení je realizováno pouze lepením, což funkčně není dostačující. V opačném případě pro trubky s průměrem 10,97 mm hrozí, že dojde k lisování válečku s reálným přesahem 0,08 mm! Při lisování se potom třídí kusy, kde dojde k zalisování až po zanýtovaný kolík – zde dochází následně k vytažení a lisování válečku s větším přesahem. Druhý případ je nedolisování na požadovanou hodnotu a takový kus je vytríděn jako neopravitelný zmetek.

Tab.5.1 Stávající technologický postup

Číslo operace	Název pracoviště	Číslo pracoviště	Popis činnosti
10	Tříbodové měřidlo	1315	Měření vnitřního průměru 20ks
			Stanovení broušeného přesahu
20	Bruska	0922	Broušení vnějšího průměru válečku
30	Hydraulický lis	0941	Zalisovat váleček do trubky
			Kontrola dolisování a prasklin
40	Kontrola Flux	0913	Kontrola prasklin na trubce po 24 hodinách
50	Montáž	02510	Lepení rukojeti
			Nasazení okroužku
			Vizuální kontrola
60	Kontrola	01313	Kontrola prodloužení před naskladněním 100%

## 5.2 Navrhovaný technologický postup - vystružování

Základem pro navrhovaný technologický postup je předpoklad, že je třeba snížit rozpětí vnitřních průměrů u trubek tak, aby nemohlo dojít k situaci, kdy nebude možné vzhledem k velkému přesahu dolisovat váleček v trubce do příslušné hloubky a nebo naopak ke snaze lisovat do sebe váleček a trubku, které jsou vzájemně bez přesahu. Problém by mělo odstranit vystružování vnitřního průměru s přesností 0,02 mm, což odpovídá i přesnosti broušení. V důsledku by se potom měly rozměry všech trubek i válečků pohybovat v tomto tolerančním poli. Nebylo by tak nutné sledovat každou zakázku zvlášť a hlídat, aby nedošlo k promíchání trubek a válečků mezi jednotlivými zakázkami.

Dle výsledků zkoušek by podle předpokladu mělo následně dojít k odstranění operací Kontrola Flux a 100% kontrola z technologického postupu, protože vznik trhlin u trubek by měl být eliminován.

Tab. 5.2 Navrhovaný technologický postup včetně operace vystružování

Číslo operace	Název pracoviště	Číslo pracoviště	Popis činnosti
10	Vrtačka	2100	Vystružit vnitřní průměr trubky
20	Bruska	0922	Broušení vnějšího průměru válečku
30	Hydraulický lis	0941	Zalisovat váleček do trubky
			Kontrola dolisování a prasklin
40	Kontrola Flux	0913	Kontrola prasklin na trubce po 24 hodinách
50	Montáž	02510	Lepení rukojeti
			Nasazení okroužku
			Vizuální kontrola
60	Kontrola	01313	Optická kontrola prodloužení před naskladněním 100%

## 5.3 Navrhovaný technologický postup – selektivní montáž

Další možností jak upravit technologický postup, aby došlo k eliminaci zmetkovitosti, je vložení operace 100 % kontrola vnitřního průměru trubky. Jednalo by se o přeměření vnitřního průměru trubky tříbodovým dutinovým mikrometrem a následné rozřídění do skupin. Z obrázku Obr.2.2 lze přibližně usuzovat rozdělení četností vnitřních průměrů dodaných trubek. Měření vnitřního průměru by se provádělo v hloubce 25 mm od okraje trubky, aby hodnoty byly pro všechny kusy měřeny ve stejném místě.

I u tohoto návrhu změny technologického postupu by po proběhnutí zkoušek měla být odstraněny operace Kontrola Flux a 100% optická kontrola před naskladněním.

Předpokládané rozdělení trubek do skupin dle hodnot vnitřních průměrů a k nim broušených válečků je v tabulce Tab.5.3. Navrhovaný technologický postup s operací 100 % kontrola vnitřního průměru je v tabulce Tab.5.4.

Tab. 5.3 Rozdělení trubek a válečků do skupin podle hodnot vnitřního průměru trubek a vnějšího průměru válečku [mm]

Skupina	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Vnitřní průměr trubky	11,00	11,01	11,02	11,03	11,04	11,05	11,06	11,07	11,08
Vnější průměr válečku	10,96 -	10,97 -	10,98 -	10,99 -	11,00 -	11,01 -	11,02 -	11,03 -	11,04 -
	10,98	10,99	11,00	11,01	11,02	11,03	11,04	11,05	11,06

Tab. 5.4 Navrhovaný technologický postup včetně operace 100 % kontrola

Číslo operace	Název pracoviště	Číslo pracoviště	Popis činnosti
10	Příjem zboží	1315	100% kontrola vnitřního průměru trubky
20	Bruska	922	Broušení vnějšího průměru válečku
30	Hydraulický lis	941	Zalisovat váleček do trubky
			Kontrola dolisování a prasklin
40	Kontrola Flux	913	Kontrola prasklin na trubce po 24 hodinách
50	Montáž	2510	Lepení rukojeti
			Nasazení okroužku
			Vizuální kontrola
60	Kontrola	1313	Optická kontrola prodloužení před naskladněním 100%

Tento navrhovaný technologický postup skrývá riziko nepřesnosti měření, chyby způsobené lidským faktorem a změny průřezu podél osy trubky. Nezaručuje tedy takovou přesnost jako technologický postup obsahující vystružování.

Vzhledem k zaručení vyšší přesnosti, omezení rizika smíchání kusů s různými rozměry a omezení skladových zásob byla zvolena varianta technologického postupu obsahující vystružování.

## 6 STROJNÍ VYBAVENÍ

Podrobnější popis strojního vybavení se týká strojů, které mají bezprostřední vliv na rozměr lisovaných částí a samotný proces lisování.

### 6.1 Hydraulický lis<sup>5</sup>

Zalisování válce do trubky se provádí na hydraulickém lisu REOS HP 100 od výrobce Ostroj Opava a.s. Jedná se o lis vhodný pro tvářecí operace za studena (tažení, ohýbání, rovnání, stříhání), ale i montážní a údržbářské práce (zalisování, vylisování). V nutných případech je možné lis použít i pro tváření za tepla (děrování, prostřihování), ražení a kalibrování.

Pro případ lisování, kterým se zabývá tato práce, je vhodný vzhledem k velké pracovní dráze. Na lise je i možnost regulace pracovní rychlosti beranu. Další použití je pro lisování hlavy kladivové ráčny na trubku, stopkování čepelí apod.

Hydraulický lis je elektrohydraulicky ovládané zařízení. Do ocelového rámu je vestavěn hydraulický válec, který pomocí hydraulického rozvodu přenáší lisovací sílu. Směr působení síly je ve směru proti upínací desce stolu. Obsluha je prováděna nožním pedálem, který je připojen na hlavní blok ovládání na elektrickém rozvaděči. Je možno nastavit zdvih beranu, rychlost chodu a dobu lisování.

Tab. 6.1 Technické parametry hydraulického lisu

Jmenovitá lisovací síla [kN]	1000
Zpětná síla [kN]	184
Hmotnost [kg]	5000
Rozměry lisu	
Šířka x hloubka x výška [mm]	1035 x 1596 x 3100
Výška pracovního prostoru [mm]	648
Zdvih beranu [mm]	500
Rychlost beranu	
Lisovací rychlost [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	27
Přibližovací rychlost [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	160
Zpětná rychlost [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	150
Pracovní kapalina	OT-T68
Objem olejové nádrže [ $\text{dm}^3$ ]	250

### 6.2 Bruska<sup>7</sup>

Broušení válečku pro zalisování se provádí na brusce pro bezhroté broušení SENY – Model R-60H. Váleček se brousí v zakaleném stavu do vzdálenosti 54,5 mm od kraje. Broušení probíhá mezi brusným kotoučem (povrch DA 60 - L 5 – V 10 W) a přítlačným kotoučem. Správná míra broušení je zajištěna pomocí vyhazovače. Přesnost broušení je 0,02 mm.

### 6.3 Vrtačka<sup>9</sup>

Vystružování by se mělo provádět na sloupové vrtačce HS-35 VG od německého výrobce CORDIA. Jedná se o vrtačku s automatickým posuvem a třemi stupni rychlosti otáček. Pro vystružování se bude používat výstružník od výrobce WNT označení 11,10 H7x200 HSS-E 9303036400 KW40/10. Míra pro vystružování je 11,10 mm.

Tab. 6.2 Technické parametry vrtačky

Max. vrtaný průměr [mm]	35 mm
Vrtací vřeteno	MK 4
Rok výroby	1974
Otáčky vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ]	38-1450
Zdvih vřetena [mm]	160
Rozpětí [mm]	350
Posuv [mm]	0,1 - 0,35
Rozměr stolu [mm]	500 x 500
Váha [kg]	496

## 7 VÝPOČTOVÁ ČÁST

Cílem výpočtu je určit přesah v nalisovaném spoji tak, aby nebyl překročen mezní stav pružnosti. Tento výpočet zahrnuje rozpětí tolerančního pole vnitřního a vnějšího průměru trubky a případné odchylky, které byly uvolněny vstupní kontrolou pro další zpracování.

Vnější průměr trubky se má pohybovat rozmezí  $16 + 0,05$  mm a rozměry dodaných trubek se pohybují v tolerančním poli.

Vnitřní průměr trubky se má pohybovat v rozmezí  $11 + 0,05$  mm. Dodané trubky vykazují odchylky a byly uvolněny s rozsahem rozměrů  $11,00 + 0,08$  mm.

Řešení je provedeno použitím následujících výpočtových modelů:

- 1) Tenkostěnný kroužek (slabě zakřivený prut)
- 2) Válcové těleso zatížené vnitřním tlakem
- 3) Soustava dvou válcových těles nasazených na sebe s přesahem (vnitřní těleso bez otvoru)

### 7.1 Metoda výpočtu pro tenkostěnný kroužek (slabě zakřivený prut)<sup>1</sup>

Pro tuto metodu uvažujeme nalisovaný spoj jako dvourozměrný kroužek, jehož vnitřní povrch je tlakově zatížen. Střednice prutu je tvaru kružnice. Kroužek je rotačně symetricky zatížený a zatížení kroužku je vzhledem k přesahu deformační.

Na jednonásobně elementární prvek  $\Omega_1$  po uvolnění z kroužku působí tyto složky napětí:

- Obvodové napětí  $\sigma_t$  v příčném průřezu
- Radiální napětí  $\sigma_p$  na válcových řezech

U tenkostěnného kroužku je možné napětí  $\sigma_p$  vzhledem k napětí  $\sigma_t$  zanedbat. Existuje zde tedy přibližně jednoosá homogenní napjatost.

Dále se řeší podmínka statické rovnováhy prvku  $\Omega_1$ :

$$dF_o - \frac{2 \cdot N \cdot \sin d\varphi}{2} = 0 \quad (7.1)$$

kde  $dF_o$  je elementární síla zatěžující prvek  $\Omega_1$

$N$  je normálová síla

$d\varphi$  je elementární úhel prvku  $\Omega_1$

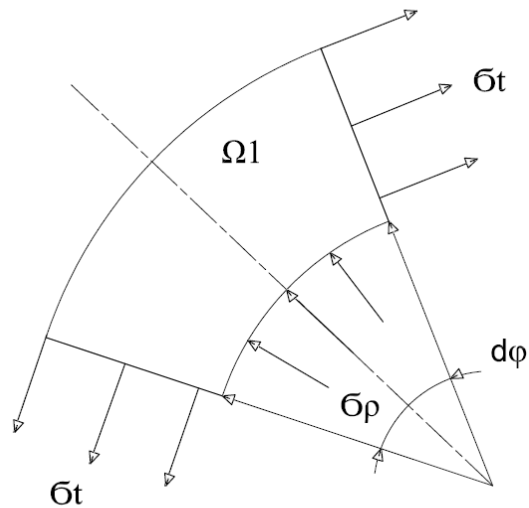
Protože pro malé úhly platí  $\sin \frac{d\varphi}{2} = \frac{d\varphi}{2}$  výsledkem je vztah pro  $N$ :

$$N = \frac{dF_o}{d\varphi} \quad (7.2)$$

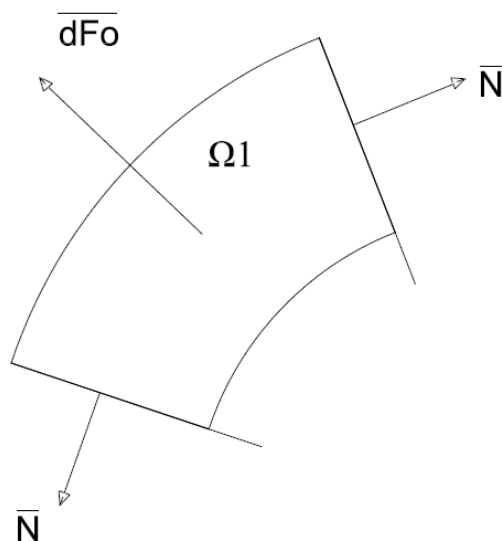
Pro elementární sílu  $dF_o$ , která zatěžuje elementární prvek  $\Omega_1$  platí vztah:

$$dF_o = p \cdot dS = p \cdot b \cdot R \cdot d\varphi \quad (7.3)$$

kde  $p$  je tlak působící na vnitřní povrch kroužku  
 $dS$  je vnitřní plocha elementárního prvku  $\Omega_1$   
 $b$  je šířka prstence  
 $R$  je poloměr střednice



Obr. 7.1 Složky napětí působící na základní prvek  $\Omega_1^1$



Obr.7.2 Síly působící na elementární prvek<sup>1</sup>

Pro obvodové napětí v elementárním prvku platí vztah:

$$\sigma = \frac{N}{S} = \frac{N}{bh} \quad (7.4)$$

kde b je šířka prstence  
h je tloušťka prstence

Potom:

$$\sigma = \frac{dF_p}{b \cdot h \cdot d\varphi} = \frac{p \cdot R}{h} \quad (7.5)$$

Pro řešení úlohy touto metodou je nutné, aby platily následující předpoklady:

- Střednicí prutu musí být rovinná křivka
- Příčný průřez musí mít rovinu symetrie, která leží v rovině prutu
- Prut je zatížen rovinou silovou soustavou, která působí v rovině prutu

Změna poloměru střednice se  $\Delta R$  vypočte ze vztahu:

$$\Delta R = \varepsilon_t \cdot R = \frac{\sigma}{E \cdot R} = \frac{p \cdot R^2}{h \cdot E} \quad (7.6)$$

kde  $\varepsilon_t$  je přetvoření poloměru střednice  
E je modul pružnosti v tahu

### 7.1.1 Výpočet pro tenkostěnný kroužek (slabě zakřivený prut)<sup>2</sup>

Pro případ výpočtu podle metody slabě zakřiveného prutu je průřez trubky uvažován jako kroužek, na jehož vnitřní povrch působí tlakové zatížení. Hodnoty pro výpočet jsou následující :

$$k = 1$$

$$\sigma_k = 700 \text{ MPa}$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$\text{Maximální vnější poloměr prstence } R_{\max 1} = 16,00 \text{ mm}$$

$$\text{Minimální vnější poloměr prstence } R_{\min 1} = 15,95 \text{ mm}$$

$$\text{Maximální vnitřní poloměr prstence } R_{\max 2} = 11,05 \text{ mm}$$

$$\text{Minimální vnitřní poloměr prstence } R_{\min 2} = 10,97 \text{ mm}$$

Dle čtyř různých krajních hodnot tolerancí vnějšího a vnitřního průměru může dosahovat poloměr střednice R hodnot:

$$R_1 = \frac{(R_{\max 1} - R_{\min 2})}{2} + R_{\min 2} = \frac{(16,00 - 10,97)}{2} + 10,97 = 13,49 \text{ mm}$$

$$R_2 = \frac{(R_{\max 1} - R_{\max 2})}{2} + R_{\max 2} = \frac{(16,00 - 11,05)}{2} + 11,05 = 13,53 \text{ mm}$$

$$R_3 = \frac{(R_{\min 1} - R_{\min 2})}{2} + R_{\min 2} = \frac{(15,95 - 10,97)}{2} + 10,97 = 13,46 \text{ mm}$$

$$R_4 = \frac{(R_{\min 1} - R_{\max 2})}{2} + R_{\max 2} = \frac{(15,95 - 11,05)}{2} + 11,05 = 13,50 \text{ mm}$$

Těmto hodnotám poloměrů střednice odpovídají tyto tloušťky prstence:

$$h_1 = 5,03 \text{ mm}$$

$$h_2 = 4,95 \text{ mm}$$

$$h_3 = 4,98 \text{ mm}$$

$$h_4 = 4,90 \text{ mm}$$

Ze vztahu (7.4) se pro výše uvedené rozměry stanoví velikost stykového tlaku  $p$ :

$$p_1 = \frac{\sigma_k}{k} \cdot \frac{h_1}{R_1} = \frac{700}{1} \cdot \frac{5,03}{13,49} = 261 \text{ MPa}$$

$$p_2 = \frac{\sigma_k}{k} \cdot \frac{h_2}{R_2} = \frac{700}{1} \cdot \frac{4,95}{13,53} = 256 \text{ MPa}$$

$$p_3 = \frac{\sigma_k}{k} \cdot \frac{h_3}{R_3} = \frac{700}{1} \cdot \frac{4,98}{13,46} = 259 \text{ MPa}$$

$$p_4 = \frac{\sigma_k}{k} \cdot \frac{h_4}{R_4} = \frac{700}{1} \cdot \frac{4,90}{13,50} = 254 \text{ MPa}$$

Maximální stykový tlak  $p$  odpovídá hodnotě  $p_1 = 261 \text{ MPa}$ . Pro jednotlivé velikosti stykového tlaku u všech variant se vypočte změna poloměru střednice kroužku podle vzorce (7.5):

$$\Delta R_1 = \frac{p_1 \cdot R_1^2}{h_1 \cdot E} = \frac{261 \cdot 13,49^2}{5,03 \cdot 2 \cdot 10^5} = 4,72 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

$$\Delta R_2 = \frac{p_2 \cdot R_2^2}{h_2 \cdot E} = \frac{256 \cdot 13,53^2}{4,95 \cdot 2 \cdot 10^5} = 4,73 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

$$\Delta R_3 = \frac{p_3 \cdot R_3^2}{h_3 \cdot E} = \frac{259 \cdot 13,46^2}{4,98 \cdot 2 \cdot 10^5} = 4,71 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

$$\Delta R_4 = \frac{p_4 \cdot R_4^2}{h_4 \cdot E} = \frac{254 \cdot 13,50^2}{4,90 \cdot 2 \cdot 10^5} = 4,72 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

Hodnoty  $\Delta R_{1-4}$  jsou teoretické přesahy pro nasazení kroužku na těleso kruhového průřezu, při kterých nepřesáhne napětí v kroužku hodnotu meze kluzu  $\sigma_k$ .

Extrémním případem pro lisování je situace, kdy kroužek o minimální poloměru je nasazován na těleso kruhového průřezu, jehož poloměr odpovídá maximální vyrobené velikosti. V tomto případě dosahuje změna poloměru střednice kroužku  $\Delta R_{\max} = 8 \cdot 10^{-2}$  mm. To může nastat v případě  $R_1$  a  $R_3$ , protože zde je vnitřní poloměr na spodní hranici.

Dosazením se potom vypočte velikost stykového tlaku  $p_{\max 1}$  a  $p_{\max 2}$  :

$$p_{\max 1} = \frac{\Delta R \cdot h_1 \cdot E}{R_1^2} = \frac{0,08 \cdot 5,03 \cdot 2 \cdot 10^5}{13,49^2} = 442 \text{ MPa}$$

$$p_{\max 2} = \frac{\Delta R \cdot h_2 \cdot E}{R_2^2} = \frac{0,08 \cdot 4,98 \cdot 2 \cdot 10^5}{13,46^2} = 439 \text{ MPa}$$

Dalším krokem je výpočet maximálního napětí v materiálu při těchto stykových tlacích:

$$\sigma_{\max 1} = \frac{p_{\max 1} \cdot k \cdot R_1}{h_1} = \frac{442 \cdot 1 \cdot 13,49}{5,03} = 1185 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max 2} = \frac{p_{\max 2} \cdot k \cdot R_2}{h_2} = \frac{439 \cdot 1 \cdot 13,46}{4,98} = 1186 \text{ MPa}$$

Z výsledků vyplývá, že v případě, kdy přesah je vyšší než  $4,7 \cdot 10^{-2}$  mm, napětí v materiálu přesahuje jeho mezní stav pružnosti.

## 7.2 Metoda výpočtu pro válcové těleso zatížené vnitřním tlakem<sup>3</sup>

Ocelová trubka se považuje za válcové těleso, na jehož vnitřní stranu působí tlak v radiálním směru. Uvažované válcové těleso je v prostoru ohraničeno dvěma koncentrickými válcovými plochami a dvěma rovnoběžnými čely, které jsou kolmé na osu tělesa. Nezávislý posuv vzniká v radiálním směru, ve směru osovém je nulový.

Základem pro sestavení rovnic statické rovnováhy je uvolněný prvek válcového tělesa (Obr.7.3). V jednotlivých řezech působí napětí:

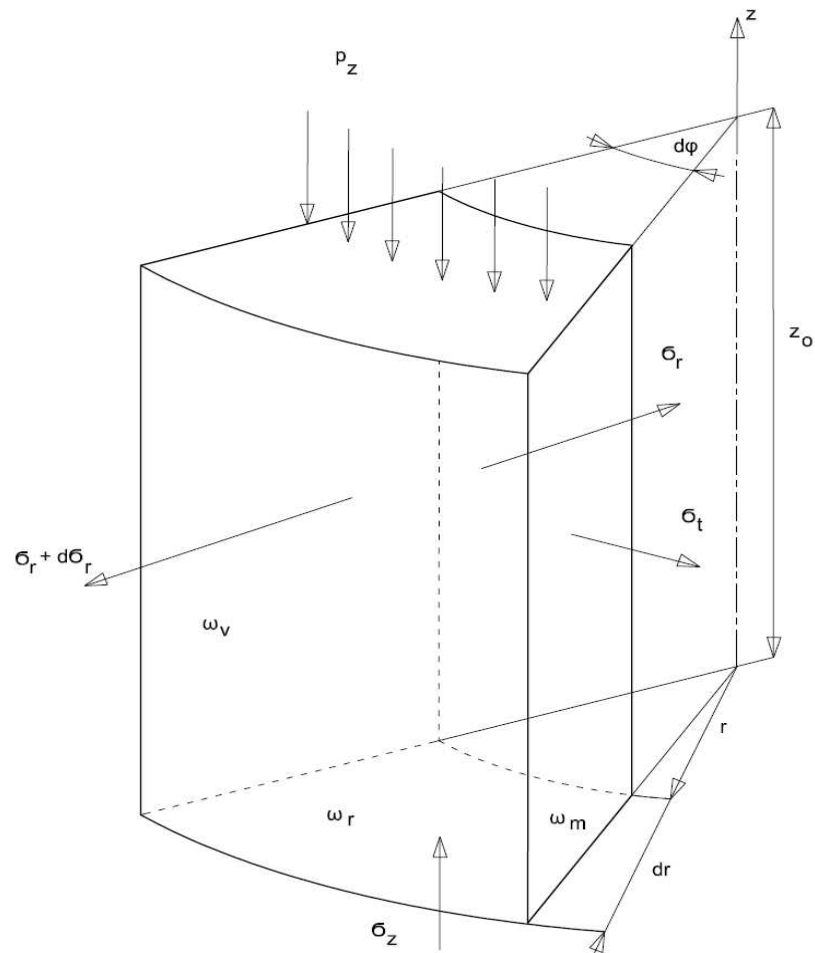
- Válcový řez  $\omega_v$  – radiální napětí  $\sigma_r$
- Meridiánový řez  $\omega_m$  – obvodové napětí  $\sigma_t$

Pro deformaci válcového tělesa platí, že je zachována jeho válcovitost. Z toho vyplývá, že body v meridiánové rovině  $\omega_m$  jí musí náležet i po deformaci, válcové řezy zůstávají válcovými a radiální řezy zůstávají rovinnými. Deformace je určena délkovými přetvořeními  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_t$ . Úhlová přetvoření jsou nulová.

Z rovnice rovnováhy pro radiální a osový směr vyplývá:

$$\sigma_r - \sigma_t + \frac{r \cdot d\sigma_r}{dr} = 0 \quad (7.7)$$

$$\sigma_z = p_z \quad (7.8)$$



Obr.7.3 Uvolněný elementární prvek  $\Omega_v$  válcového tělesa a působící elementární síly<sup>3</sup>

Pro délková přetvoření platí geometrické rovnice:

$$\varepsilon_t = \frac{u}{r} \quad (7.9)$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (7.10)$$

$$\varepsilon_z = \frac{dw}{dz} \quad (7.11)$$

Konstitutivní vztahy pro trojosou napjatost jsou ve tvaru:

$$\sigma_r = \frac{E}{1+\mu} \cdot \left( \varepsilon_r + \frac{\mu}{(1-2\cdot\mu)} \cdot e \right) \quad (7.12)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1+\mu} \cdot \left( \varepsilon_r + \frac{\mu}{(1-2\cdot\mu)} \cdot e \right) \quad (7.13)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\mu} \cdot \left( \varepsilon_z + \frac{\mu}{(1-2\cdot\mu)} \cdot e \right) \quad (7.14)$$

pro

$$e = \varepsilon_r + \varepsilon_t + \varepsilon_z \quad (7.15)$$

kde  $\mu$  je součinitel příčné deformace (Poissonovo číslo), který je pro ocel 0,25.

Dosazením geometrických rovnic do konstitutivních rovnic a těchto vztahů do rovnic rovnováhy se získá vztah (za předpokladu, že  $\varepsilon_z = \text{konst.}$  a  $d\varepsilon_z / dr = 0$ ):

$$\frac{du^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0 \quad (7.16)$$

Řešení této diferenciální rovnice je:

$$u = C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} \quad (7.17)$$

Po dosazení řešení do geometrických vztahů se získají vztahy:

$$\sigma_r = A - \frac{B}{r^2} + D \quad (7.18)$$

$$\sigma_t = A + \frac{B}{r^2} + D \quad (7.19)$$

$$\sigma_z = 2 \cdot \mu \cdot A + \frac{(1-\mu) \cdot E}{(1+\mu) \cdot (1-2\cdot\mu)} \cdot \varepsilon_z \quad (7.20)$$

pro konstanty:

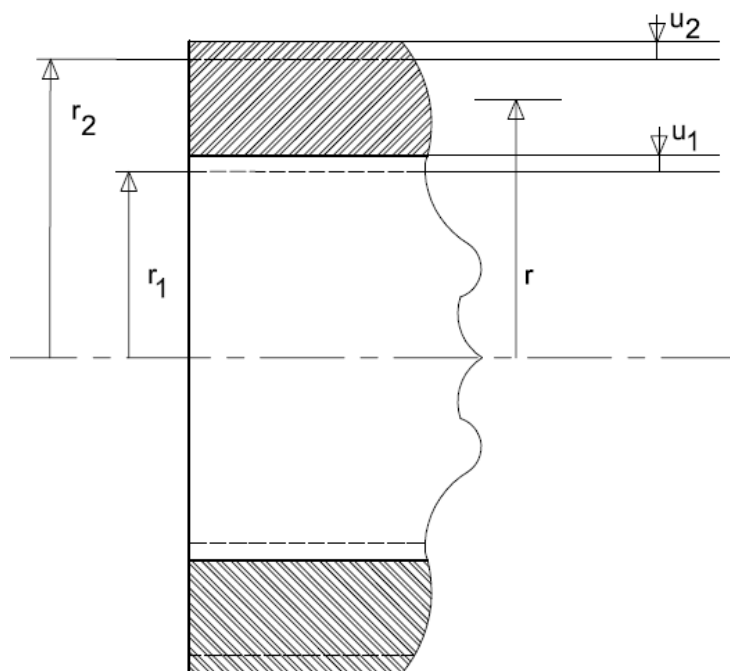
$$A = \frac{E \cdot C_1}{(1+\mu) \cdot (1-2\cdot\mu)} \quad (7.21)$$

$$B = \frac{E \cdot C_2}{(1+\mu)} \quad (7.22)$$

$$D = \frac{E \cdot \mu}{(1+\mu) \cdot (1-2\cdot\mu)} \cdot \varepsilon_z \quad (7.23)$$

Dalším krokem je dosazení okrajových podmínek do řešení diferenciální rovnice, kde se za neznámé považují konstanty  $C_1$  a  $C_2$ . Jejich vyjádřením a opětovným dosazením do řešení diferenciální rovnice se získá vztah pro posuv  $u$ :

$$u = \frac{r_2 \cdot u_2 - r_1 \cdot u_1}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r + \frac{(r_2 \cdot u_1 - r_1 \cdot u_2) \cdot r_1 \cdot r_2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r \quad (7.24)$$



Obr. 7.4 Radiální posuvy při působení tlaku na válcové těleso – okrajové podmínky pro odvození vzorců pro napětí<sup>3</sup>

Vztahy pro vyjádřené konstanty  $C_1$  a  $C_2$  se dále dosadí do vzorců pro obecné napětí:

$$\sigma_r = \left( \frac{E}{1+\mu} \right) \cdot \left( \frac{1}{1-2\cdot\mu} \cdot \frac{r_2 \cdot u_2 - r_1 \cdot u_1}{r_2^2 - r_1^2} - (r_2 \cdot u_2 - r_1 \cdot u_1) \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r^2 + \frac{\mu}{1-2\cdot\mu} \cdot \frac{\Delta l}{l} \right) \quad (7.25)$$

$$\sigma_t = \left( \frac{E}{1+\mu} \right) \cdot \left( \frac{1}{1-2\cdot\mu} \cdot \frac{r_2 \cdot u_2 - r_1 \cdot u_1}{r_2^2 - r_1^2} + (r_2 \cdot u_1 - r_1 \cdot u_2) \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r^2 + \frac{\mu}{1-2\cdot\mu} \cdot \frac{\Delta l}{l} \right) \quad (7.26)$$

$$\sigma_z = \left( \frac{E}{1+\mu} \right) \cdot \left( \frac{2}{1-2\cdot\mu} \cdot \frac{r_2 \cdot u_2 - r_1 \cdot u_1}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{1-\mu}{1-2\cdot\mu} \cdot \frac{\Delta l}{l} \right) \quad (7.27)$$

kde  $r$  je hodnota poloměru střednice  
 $l$  je délka válcového tělesa.

Při výpočtu se tedy vychází z předpokladu, že jsou známé radiální posuvy a pro ně se zjišťuje napětí.

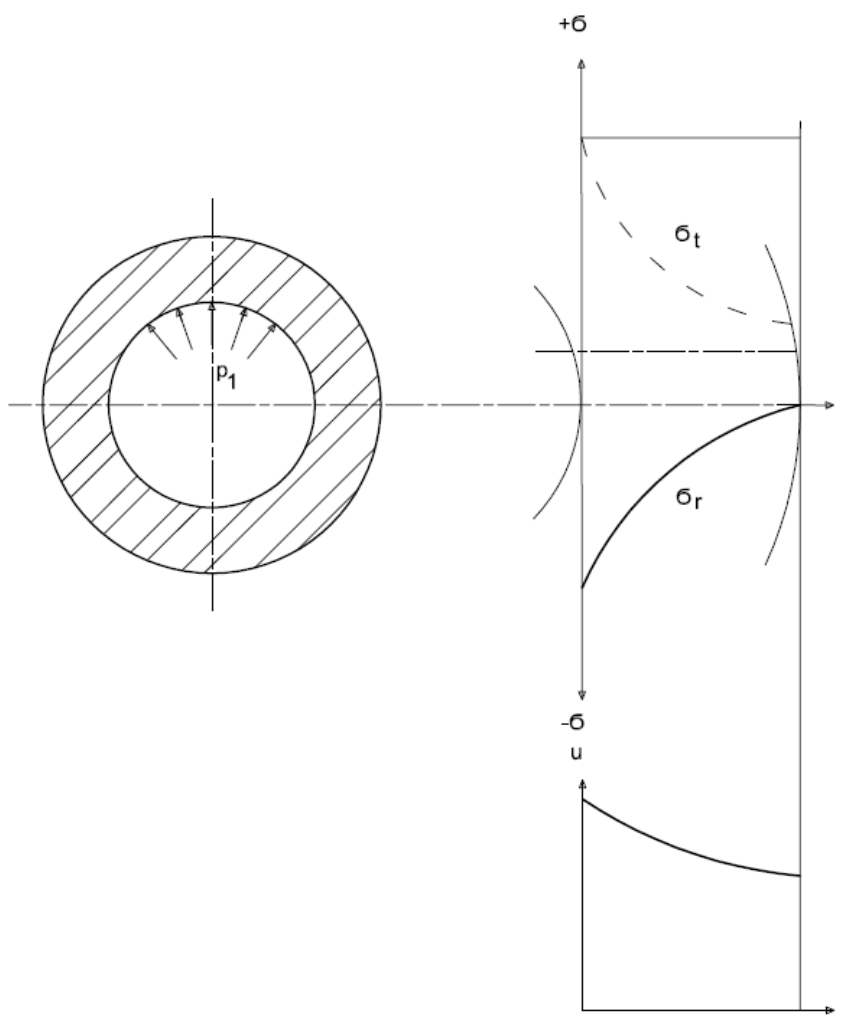
Průběh napětí po průřezu válcového tělesa je na obrázku Obr.7.5. Radiální a osová napětí  $\sigma_r$  a  $\sigma_t$  jsou symetrická s konstantami  $A$  a  $D$  a závislost na poloměru  $r$  je dána polytropou druhého stupně.

Tyto vztahy jsou použitelné pokud známe na začátku řešení radiální posuvy  $u_1$  a  $u_2$ .

Pokud naopak na začátku řešení jsou známé měrné radiální tlaky  $p_1$  a  $p_2$ , potom se určí okrajové podmínky pro poloměry  $r$  a radiální napětí  $\sigma_r$ . Výsledné vztahy pro výpočet jsou ve tvaru:

$$\sigma_r = \frac{p_1 \cdot r_1^2 - p_2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r^2 \quad (7.28)$$

$$\sigma_t = \frac{p_1 \cdot r_1^2 - p_2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r^2 \quad (7.29)$$



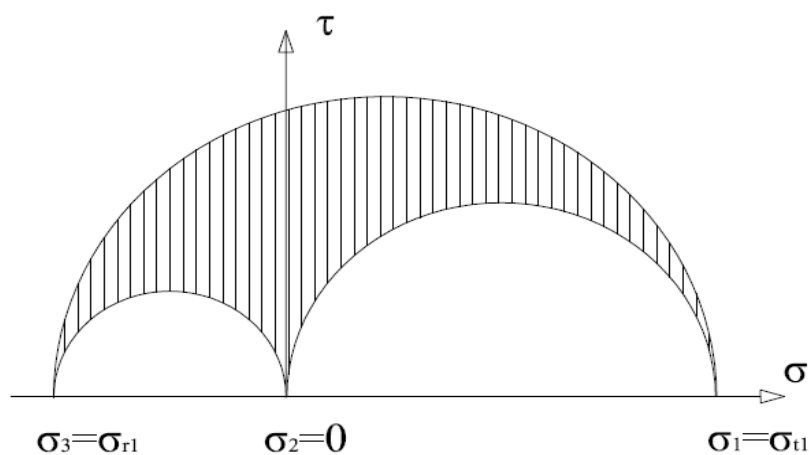
Obr. 7.5 Průběh napětí  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  a radiálního posuvu  $u$  na průřezu válcovým tělesem<sup>3</sup>

### 7.2.1 Výpočet pro válcové těleso zatížené vnitřním tlakem<sup>4</sup>

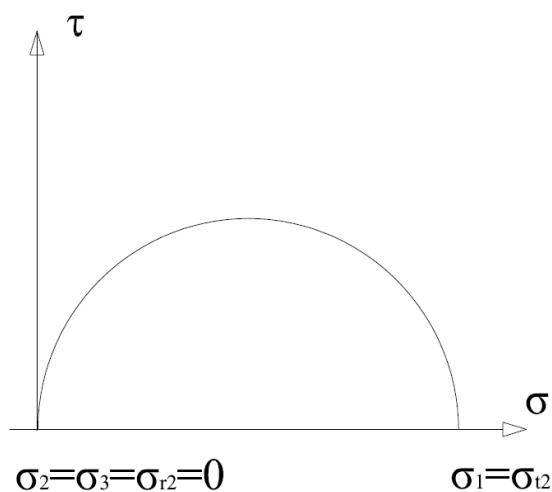
Jako první případ se uvažuje válcové těleso, na jehož vnitřní povrch působí tlak  $p_1$ . Průběh napětí  $\sigma_r$  i  $\sigma_t$  je zobrazen na Obr.7.5. Na vnitřním povrchu je napjatost rovinná ( $\sigma_2 = 0$ ), na vnějším povrchu jednoosá tahová ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 0, \sigma_1 > 0$ ).

Zobrazení napětí v Mohrově rovině pro vnitřní a vnější povrch jsou na obrázcích Obr.7.6 a 7.7 a odpovídají:

$$\begin{aligned}\sigma_{r1} &= -p_1 \\ \sigma_{r2} &= 0 \\ \sigma_{t1} &= \frac{p_1 \cdot (r_2^2 + r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} \\ \sigma_{t2} &= \frac{p_1 \cdot 2 \cdot r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}\end{aligned}$$



Obr. 7.6 Zobrazení napjatosti válcového tělesa zatíženého tlakem v Mohrově rovině na vnitřním povrchu<sup>4</sup>



Obr. 7.7 Zobrazení napjatosti válcového tělesa zatíženého vnějším tlakem v Mohrově rovině na vnějším povrchu<sup>4</sup>

Podle podmínky plasticity max  $\square$  se stanoví redukovaná napětí:

$$\sigma_{red1} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{r1} - \sigma_{r1} = \frac{p_1 \cdot 2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

$$\sigma_{red2} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{r2} - 0 = \frac{p_1 \cdot 2 \cdot r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

Vzhledem k tomu, že  $r_2 > r_1$  je i  $\sigma_{red1} > \sigma_{red2}$  nebezpečným místem bude vnitřní povrch válce. Z podmínky mezního stavu pružnosti ( $\sigma_{red1} = \sigma_k$ ) se vypočte stykový tlak  $p_1$ .

$$p_1 = \frac{\sigma_k \cdot (r_2^2 - r_1^2)}{2 \cdot r_2^2} = \frac{700 \cdot (16^2 - 11^2)}{2 \cdot 16^2} = 184 \text{ MPa}$$

Radiální posuv  $\Delta R$  se vypočte ze vztahu:

$$\Delta R = \frac{r_2}{E} \cdot (\sigma_{r1} - \mu \cdot \sigma_{r1}) = \frac{p_1 \cdot r_2}{E} \cdot \left( \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu \right) = \frac{184 \cdot 16}{2 \cdot 10^5} \cdot \left( \frac{16^2 + 11^2}{16^2 - 11^2} + 0,25 \right) = 4,49 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

### 7.2.2 Metoda výpočtu pro soustavu dvou válcových těles nasazených na sebe s přesahem (vnitřní těleso bez otvoru)<sup>3</sup>

Jako druhý případ se uvažuje soustava válcového tělesa bez otvoru a válcového tělesa s otvorem, které jsou na sebe nasazeny s přesahem. Trubka i váleček jsou ve stavu tvárném a jejich průměry se budou měnit.

Toleranci 0,05 mm u vnitřního průměru je pro výpočet vhodného přesahu možno zanedbat a počítat pouze se jmenovitou hodnotou. Předpoklad pro výpočet je, že na styčné ploše nevzniká tření a tudíž napětí  $\sigma_z$  je nulové. Pro napětí ve směru osy z tělesa lze předpokládat koncentraci v místě konce nalisovaného válečku v trubce a v místě osazení trubky. Tento výpočet je pro trubku v místě bez osazení. Pro možnost použití teorie válcového tělesa není možno stanovit průběh napětí podél osy z tělesa.

$$k = 1$$

$$\sigma_k = 700 \text{ MPa}$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

Trubka je zatížena vnitřním tlakem  $p$  a za nebezpečné místo je možno považovat vnitřní povrch ( $r = r_1$ ), kde

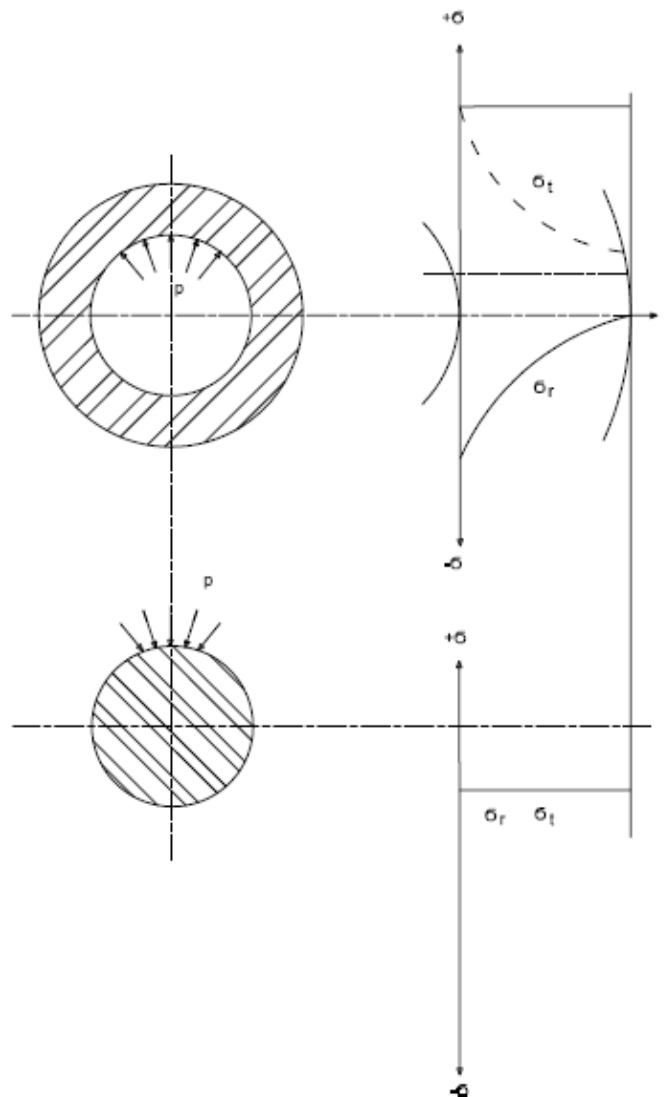
$$\sigma_{r1} = -p$$

$$\sigma_{t1} = \frac{p \cdot (r_2^2 + r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2}$$

Průběh napětí ve válečku i trubce je na Obr. 7.8. Ve válečku je napětí homogenní a odpovídá:

$$\sigma_{r_2} = \sigma_{t_2} = -p$$

Maximální napětí je napětí na vnitřním povrchu trubky  $\sigma_{t1}$ .



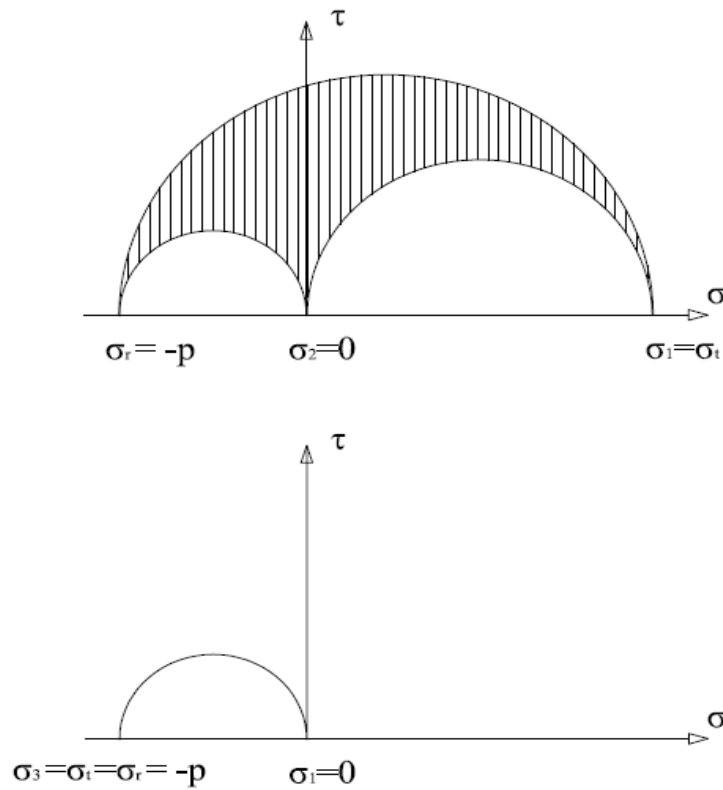
Obr. 7.8 Průběhy napětí v nalisovaném spoji válcového tělesa a hřídele<sup>3</sup>

Z podmínky, že nesmí být překročen mezní stav pružnosti ( $\sigma \leq \sigma_k$ ) je možno dostat vztah pro stykový tlak p:

$$p = \frac{\sigma_k \cdot (r_2^2 - r_1^2)}{r_2^2 + r_1^2} = \frac{700 \cdot (16^2 - 11^2)}{16^2 + 11^2} = 250 \text{ MPa}$$

kterému odpovídá přesah:

$$\Delta R = \frac{p \cdot r_1}{E} \left[ (1 - \mu) + \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu \right] = \frac{250 \cdot 11}{2 \cdot 10^5} \left[ (1 - 0,25) + \frac{16^2 + 11^2}{16^2 - 11^2} + 0,25 \right] = 5,21 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$



Obr. 7.9 Zobrazení napjatosti soustavy válcového tělesa v Mohrově rovině (nahore trubka, dole váleček)<sup>4</sup>

## 8 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Pro rozhodnutí, s jakým přesahem bude lisován váleček do trubky, je základním předpokladem nepřekročení mezního stavu pružnosti materiálu. Porovnávat se tedy musí hodnoty získané za podmínky, že maximální napětí je rovno mezi kluzu  $\sigma_k$ . Výsledky výpočtů získané uvedenými metodami se mírně liší. Odchyly je možno dobře zdůvodnit použitými předpoklady těchto metod a nepřesahují desetiprocentní odchytku od průměru.

Výsledky:

- 1)  $\Delta R = 4,71 \cdot 10^{-2}$  mm pro tenkostěnný kroužek (slabě zakřivený prut)
- 2)  $\Delta R = 4,49 \cdot 10^{-2}$  mm pro válcové těleso zatížené vnitřním tlakem
- 3)  $\Delta R = 5,21 \cdot 10^{-2}$  mm pro soustavu dvou válcových těles nasazených na sebe s přesahem (vnitřní těleso bez otvoru)

Vzhledem k přesnosti, kterou je možno dosáhnout při broušení se bude skutečný přesah pohybovat v rozmezí 0,02-0,04 mm. Maximální hodnota přesahu pro lisování válečku do trubky je pro výrobu stanovena na 0,04 mm.

### 8.1 Ekonomické zhodnocení

Vložení operace vystružování do technologického postupu výroby prodloužení vzniknou vícenáklady ve výši 3370,- Kč / 1000 ks.

Vložení operace 100 % kontrola vnitřního průměru do technologického postupu vzniknou vícenáklady 1109,- Kč / 1000 ks

Odstraněním operací Flux a 100 % optická kontrola vznikne úspora 1212,- Kč / 1000 ks.

Následkem změny technologického postupu by mělo dojít k eliminaci zmetkovitosti vlivem stabilizace vnitřního průměru trubek. Poklesem zmetkovitosti z 7,6 % na 2 % (počet zmetků v důsledku lisování s nevhodným přesahem) by se při předpokládané roční produkci 10.000 ks ušetřilo 560 ks trubek a válečků. Hodnota trubky je podle varianty technologického postupu uvedena v tabulce Tab.8.1 společně s vyčíslením úspor pro jednotlivé varianty technologického postupu.

Hodnota válečku je 15 198,- Kč / 1 000 ks

Tab. 8.1. Porovnání úspor [Kč]

Technologický postup	Současný	Nový vystružování -	Nový selektivní montáž -
Výrobní náklady na 1000ks [Kč] (včetně operace Flux a 100% optická kontrola) – Varianta I	76 892,-	80 262,-	78 001,-
Výrobní náklady na 1000ks [Kč] (po odstranění operace Flux a 100% optická kontrola) – Varianta II	76 892,-	79 050,-	76 789,-

Technologický postup	Současný	Nový vystružování	Nový selektivní montáž
Úspora poklesem zmetkovitosti z 7,6 % na 2 % = 560 ks (hodnota trubek i válečků) – Varianta I	0,-	53 457,-	52 191,-
Úspora poklesem zmetkovitosti z 7,6 % na 2 % = 560 ks (hodnota trubek i válečků) – Varianta II	0,-	52 778,-	51 512,-
Celková úspora se započtením vícenákladů při změně technologického postupu oproti současnému postupu pro množství 10 000ks – Varianta I	0,-	19 757,-	41 101,-
Celková úspora se započtením vícenákladů při změně technologického postupu oproti současnému postupu pro množství 10 000ks – Varianta II	0,-	31 198,-	52 542,-

## 9 ZÁVĚR

V této práci jsou popsány problémy (vznik trhlin) a návrh řešení při výrobě prodloužení pro kladivovou ráčnu.

Postup řešení vzniku trhlin při lisování:

- zjištění mechanických vlastností materiálu pomocí tahové zkoušky
- výpočet vhodných hodnot přesahu ( $\Delta R = 4 \cdot 10^{-2}$  mm) pro lisování válečku do trubky vycházejících ze zjištěných mechanických vlastností materiálu
- návrh změny technologického postupu (vlození operace vystružování)
- vyčíslení úspor pro předpokládanou roční produkci 10 000ks.

Pro zpřesnění výsledků by bylo vhodné doplnit práci o:

- analýzu materiálu včetně metalografického výbrusu a zhodnocení počtu vměstků
- analýzu vlivu povrchové úpravy na mechanické vlastnosti materiálu (vodíková křehkost)
- zkoušku rozháněním pro praktické ověření vypočtených hodnot přesahu
- simulaci Metodou konečných prvků.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J., BURŠA, J. *Mechanika těles Pružnost a pevnost I.* 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 287 s. ISBN 80-214-2592-X
2. JANÍČEK, P., FLORIAN, Z. *Mechanika těles Úlohy z pružnosti a pevnosti I.* 3. vyd. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., Brno, 2004. 170 s.
3. ONDRÁČEK, E., VRBKA, J., JANÍČEK, P., BURŠA, J. *Mechanika těles Pružnost a pevnost II.* 4. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 262 s. ISBN 80-214-3260-8
4. JANÍČEK, P., PETRUŠKA, J. *Pružnost a pevnost II Úlohy do cvičení.* 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 182 s. ISBN 978-80-214-3441-7
5. *Návod pro obsluhu a údržbu hydraulického lisu REOS HP 100.* OSTROJ a.s. Opava Česká republika. Říjen 1996. TP HP 100 / 0894
7. *Betriebsanleitung der Spitzenlosen Runschleifmaschine SENY Modell R-60H.* Heinz Jöcker Werkzeuge und Maschinen GmbH Germany. 1992. R-60 FIG
8. KEYTOMETALS: *List of materials* [online] [cit.2011-03-22]  
Dostupné na World Wide Web:  
<<http://www.keytometals.com/Demo.aspx?id=MechanicDemo&LN=DE&id1=40693&id2=710>>
9. CORDIA: *Anzeige der Bohrmaschinen* [online] [cit.2011-04-15]  
Dostupné na World Wide Web:  
<<http://www.maschinensucher.de/A298717/Bohrmaschinen-CORDIA-1-Stck-Type-HS-35.html>>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
b	mm	Šířka prstence
$dF_o$	N	Elementární síla
dS	mm <sup>2</sup>	Vnitřní plocha elementárního prvku $\Omega_1$
dφ	°	Elementární úhel prvku $\Omega_1$
E	MPa	Modul pružnosti v tahu
h	mm	Tloušťka prstence
k	-	Koeficient bezpečnosti
l	mm	Délka válcového tělesa
N	N	Normálová síla
p	MPa	Tlak
R	mm	Poloměr střednice
r	mm	Poloměr válcového tělesa
$R_m$	MPa	Mez pevnosti v tahu
$R_e$	MPa	Mez kluzu
u	mm	Radiální posuv
$\Delta R$	mm	Změna poloměru střednice
$\varepsilon_r$	-	Délkové přetvoření v radiálním směru
$\varepsilon_t$	-	Přetvoření poloměru střednice
$\varepsilon_t$	-	Délkové přetvoření v tečném směru
$\mu$	-	Poissonovo číslo
$\sigma_k$	MPa	Mez kluzu
$\sigma_r$	MPa	Radiální napětí
$\sigma_t$	MPa	Obvodové napětí
$\sigma_z$	MPa	Napětí ve směru osy z
$\Omega_1$	-	Elementární prvek tělesa
$\omega_m$	-	Meridiánový řez
$\omega_v$	-	Válcový řez
$\Omega_v$	-	Uvolněný prvek válcového tělesa

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1    Výkres trubky  
Příloha 2    Výkres válečku  
Příloha 3    Výkres sestavy  
Příloha 4    Materiálové listy ocelí

