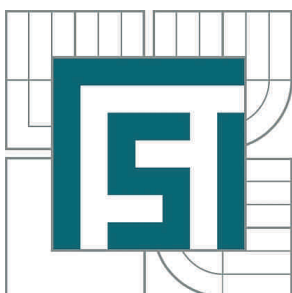


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV PROCESNÍCH PODMÍNEK A MATERIÁLU NA MEZNÍ TVAŘITELNOST ZADANÉHO DÍLCE

INFLUENCES OF PROCESS PARAMETERS AND MATERIAL ON TECHNOLOGICAL FORMING
LIMITS OF GIVEN COMPONENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JITKA EXNEROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RADKO SAMEK, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jitka Exnerová

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv procesních podmínek a materiálu na mezní tvařitelnost zadaného dílce

v anglickém jazyce:

Influences of process parameters and material on technological forming limits of given component

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zhodnocení současné technologie výroby zadané součástky a relevantních teoretických poznatků. Provedení experimentů tváření lemů při proměnných parametrech procesu a posouzení jejich vlivu na mezní technologickou tvařitelnost. Zhodnocení výsledků při zohlednění změn deformační sítě.

Cíle diplomové práce:

Provést teoretickou analýzu daného způsobu tváření lemů trubky se zaměřením na predikci vzniku defektů. Provést experimentální prověrku vlivu vybraných procesních parametrů na genezi defektů, porovnat s teoretickými poznatky a navrhnout metodiku tvorby limitních technologických grafů procesu.

Seznam odborné literatury:

1. MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.L.; HU, S.J. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2.ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 07506530000.
2. OBERLANDER, T.; WIDMANN, M. Zugumformen. In LANGE, K. Umformtechnik : Band 3-Blechbearbeitung. 1990. Berlin : Springer Verlag, 1990. s. 629. ISBN 3-540-50039-1.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Radko Samek, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 25.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na rozšiřování konců trubek. V práci jsou uvedeny teoretické poznatky, které se týkají zakončení trubek plochým lemem a kuželem. Následují experimenty provedené s vlastním materiálem a nástroji vyrobenými dle návrhu autora. Experimenty výroby ploché příruby vedly k brzkému zakroužení konce vzorku. Experimenty s kuželovým zakončením přinesly hodnotné výsledky z hlediska porovnání teoretických a naměřených sil, rozložení tloušťek a využití deformační sítě ke stanovení napětově-deformačního stavu. Rozsah rozměru kuželového zakončení byl omezen vznikem příčné vlny ve válcové části trubky.

KLÍČOVÁ SLOVA

rozšiřování, trubka, deformační síť, plochý lem, kuželová příruba

ABSTRACT

Master's thesis is focused on flaring of tubes' endings. There are also mentioned theoretical pieces of knowledge which relate to tubes' endings by a flat edge and a cone. The following experiments performed with the own material and tools made by the author's design. Experiments in the production of the flat collar led to the speedy rotation of the sample ending. Experiments with the conical ending brought valuable results from the point of view of comparison of theoretical and measured powers, distribution of thicknesses and utilization of the deformation web to set voltage-deformation state. The dimension extent of the conical ending was limited by the formation of buckling in the cylindrical part of the tube.

KEYWORDS

flaring, tube, deformation web, flat edge, conical collar

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

EXNEROVÁ, Jitka. *Vliv procesních podmínek a materiálu na mezní tvařitelnost zadaného dílce*. Brno, 2015. 54s, 2 výkresů, 3 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce prof. Ing. Radko Samek CSc.

PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Radko Samkovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Úvod	10
1 Rozbor současného stavu výroby	11
2 Současný teoretický stav problému	13
2.1 Rozšiřování trubek do ploché příruby	14
2.1.1 Popis napětově-deformačního vztahu	14
2.1.2 Rozbor jednotlivých složek deformačního odporu	15
2.1.3 Určení síly	16
2.1.4 Zhodnocení	16
2.2 Rozšiřování trubek do tvaru kužele	17
2.2.1 Popis napětově-deformačního vztahu	17
2.2.2 Určení síly	19
2.3 Technologické defekty při tváření	19
2.4 Problematika deformačních sítí	20
3 Vymezení cílů práce	22
4 Experimentální část	24
4.1 Plánování experimentu	24
4.1.1 Určení délky vzorku	24
4.1.2 Proměření polotovaru	27
4.1.3 Návrh nástroje	29
4.1.4 Nanesení deformační sítě	30
4.2 Provedení experimentu	31
4.2.1 Experiment - výroba ploché příruby	31
4.2.2 Experiment - výroba kuželové příruby	35
4.3 Výpočtové vyhodnocení experimentu	42
4.3.1 Stanovení tahového napětí a poměrné deformace na hraně vzorku	42
4.3.2 Kontrola korekce	43
4.3.3 Reálné hodnoty lokálních deformací	45
4.3.4 Stanovení tloušťek pomocí deformační sítě	46
4.3.5 Stanovení napětového stavu	47
5 Konfrontace teorie s experimentem	49
5.1 Stanovení teoretické zatěžující síly	49
5.2 Vyhodnocení zatěžujících sil	50
5.3 Stanovení teoretického průběhu tloušťky	51
5.4 Vyhodnocení průběhů tloušťek	53
6 Závěry	54

Seznam použitých zdrojů

Seznam symbolů a zkratek

Seznam obrázků a tabulek

Seznam výkresů

Seznam příloh

ÚVOD [4], [24], [25], [26], [27]

V současné době je kladen velký důraz na snižování výrobních nákladů při zachování požadované kvality. Požadavek lze řešit snižováním počtu operací, což vede ke snižování celkového času výroby součástí. Další možnou variantou je snižování odpadního materiálu, spotřeby energie, snižování lidské práce, automatizace atd. Cílem, jak tohoto dosáhnout, je zvolení optimální výrobní technologie.

Strojírenská technologie nabízí řadu výrobních metod. Každý typ součásti má proto několik možných postupů výroby. Optimální výrobní postup odpovídá vyváženosti výše uvedených kritérií při zohlednění počtu vyráběných kusů. Například dílce ve formě potrubí budou vyráběny tvářením z polotovaru ve tvaru trubky namísto obráběním z kruhové tyče.

Při tvarování dílců trubek se užívá mnoho metod tvářením. Trubky lze různě tvarovat, ohýbat, rozšiřovat a zužovat. Příklady možných tvarů a úprav konců jsou znázorněny na obr. 1.

Diplomová práce se zabývá rozšiřováním konců trubek, které lze využít například v leteckém a automobilovém průmyslu, ke spojování potrubí, ve vzduchotechnice, sanitární technice, ve výrobě spotřebního či dekorativního zboží.



Obr. 1: Příklady tvářením trubek [4], [24], [25], [26],

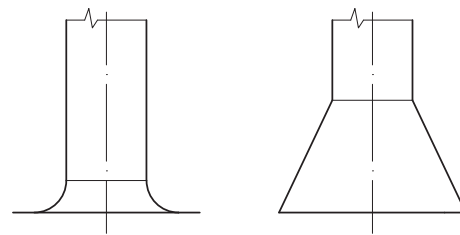
1 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU VÝROBY [10], [20]

Pro zkoumání interference vlivů podílejících se na vzniku defektů byla v rámci diplomové práce zadána součástka ve formě tenkostěnné trubky zakončená plochým lemem a dále kuželovým hrdlem. Charakteristické obecné tvary konečných experimentálních součástek dle zadání diplomové práce představují náčrtky na obr. 2.

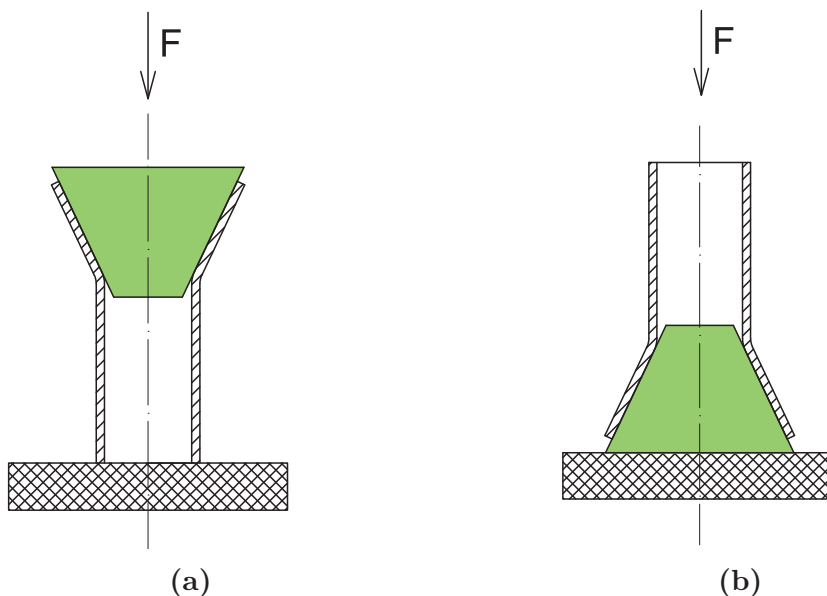
Výroba těchto prvků je velmi užívaným technologickým procesem. Podobných součástek se vyrábí velké množství o různých rozměrech, které se mohou běžně pohybovat okolo průměru trubky $5 \div 100 \text{ mm}$ a tloušťky stěny $0,5 \div 2 \text{ mm}$. Vyskytují se ale i součástky o průměru 300 mm s tloušťkou stěny 5 mm . Trubky o menších průměrech se většinou vyrábějí redukčním válcováním či tažením přes redukční očko, zatímco větší jsou svařované. U svařovaných trubek si lze zvolit průběh vláken, a to podle orientace plechu při stříhání polotovaru pro takto vyrobenou trubku.

Kromě již zmíněných možností zakončení trubek (obr. 2) se vyskytují i jiné druhy rozšíření či zúžení, jako je například zpětné zakroužení, které lze považovat za defekt, ale v některých případech je tento tvar žádaný. Příkladem využití zpětného zakroužení může být *Ochranná vložka* vyráběná ve firmě Strojírny Olšovec, která s laskavostí poskytla fotodokumenty, jež jsou umístěny v příloze 1.

Existují dva hlavní způsoby výroby tvarů vyznačených na obr. 2. Liší se pouze v poloze činného nástroje, jak je znázorněno na obr. 3. První varianta (obr. 3a) využívá nástroj umístěný na horním okraji polotovaru a při zatížení vnější silou se tento nástroj zasouvá do materiálu. Druhá varianta (obr. 3b) uvažuje statický nástroj, na který se nasouvá trubka, na jejíž čelo působí aktivní síla. Oba dva tyto způsoby se mohou použít jak na rozšiřování, tak i pro zužování konce trubek.

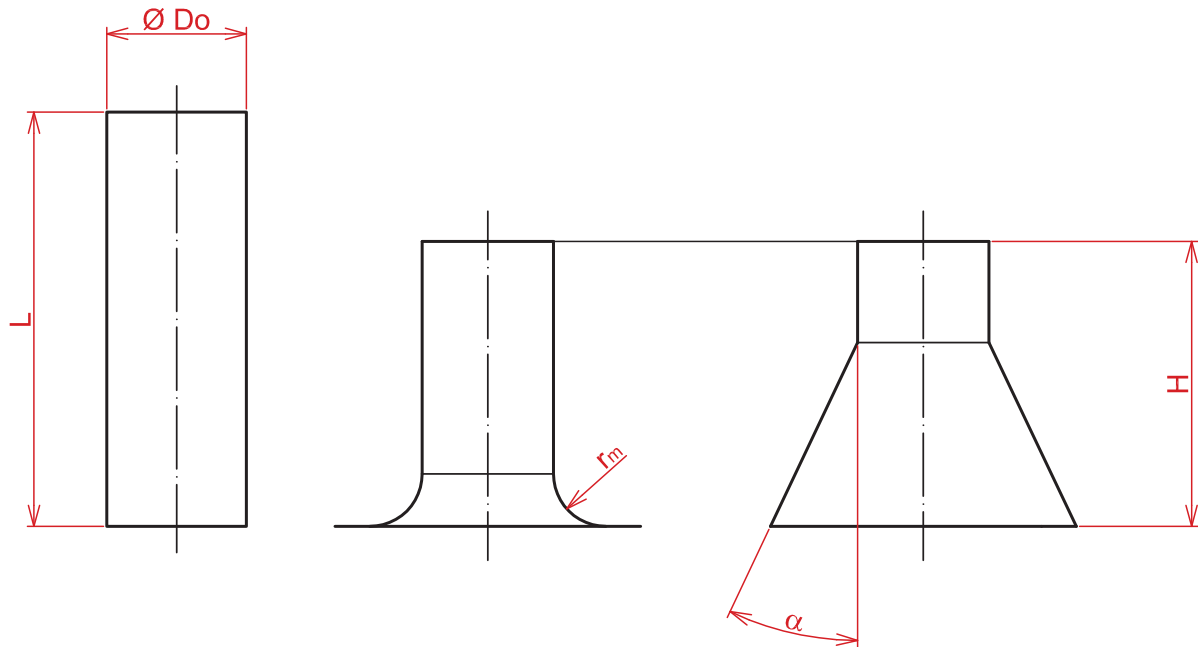


Obr. 2: Tvary zakončení trubek [20]



Obr. 3: Varianty polohy činného nástroje [10]

Kvalita výrobku souvisí s odhalením příčin vzniku defektu, jejichž geneze je v průběhu výroby velmi důkladně sledována. Podíl na vzniku defektu u součásti mají také kromě materiálových a technologických vlivů, které budou podrobněji popsány v následující kapitole, i geometrické parametry zadané součásti, které jsou vyznačeny v obr.4. Jde o průměr polotovaru " D_0 ", výchozí délku polotovaru " L ", poloměr lemu " r_m " a úhel hrdla " α ".



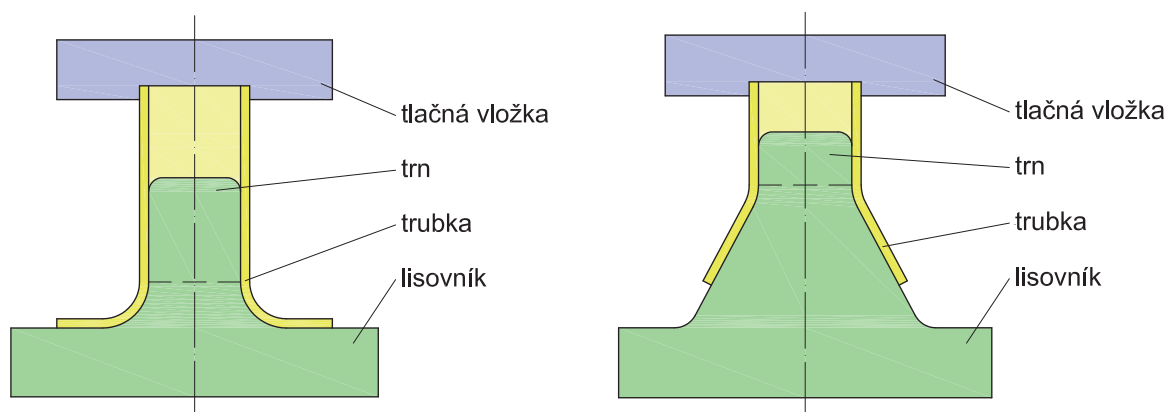
Obr. 4: Základní rozměry polotovaru a výlisků

Při příliš velkých rozměrech délky polotovaru je nutné použít speciální přípravek, ve kterém je nutno trubku podepřít, aby se zajistila vzpěrná stabilita. Poloměr lemu " r_m " nesmí být ostrý, lze jej určit podle tloušťky stěny trubky a to na základě doporučení užívaných při ohybu plechu. Vhodný optimální úhel hrdla " α " pro účely experimentů je $10^\circ \div 30^\circ$.

2 SOUČASNÝ TEORETICKÝ STAV PROBLÉMU

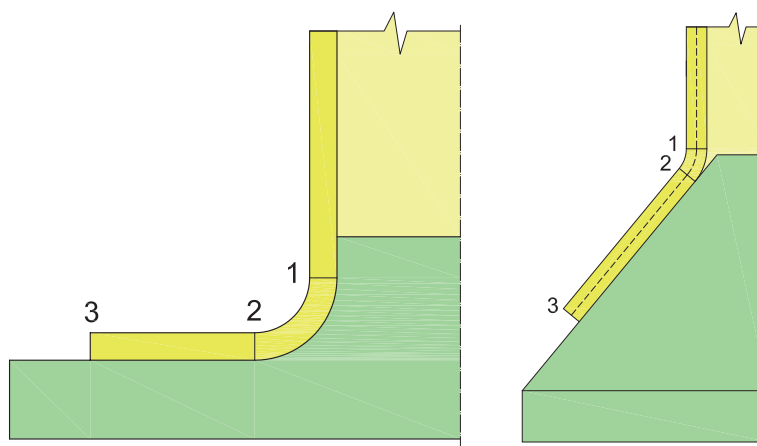
[20], [27]

Při operaci rozšiřování trubek dochází k tváření volného konce trubky do různých tvarů. Samotný tvářecí proces spočívá v postupném nasunutí polotovaru na trn lisovníku pomocí vnější síly. Síla je rovnoměrně rozložena po celé stykové ploše polotovaru (trubky) pomocí tlačné vložky. Geometrie lisovníku je závislá na požadovaném tvaru zakončení trubky. Příklad tohoto procesu s jeho uspořádáním polotovaru a nástroje je znázorněn na obr. 5.



Obr. 5: Příklad procesu rozšiřování [20]

Rozšiřování trubek má dvě fáze: ohyb a následnou tvorbu lemu či kužele. Mezi body 1-2 dle obr. 6 je oblast ohybu a body 2-3 označují oblast formování konce trubky. Nicméně i v oblasti ohybu probíhá rozšiřování z poloměru " r_s " (střední poloměr trubky) na poloměr " r " (poloměr konce rádiusu), který pochopitelně navyšuje deformační odpor. Během tváření je vnější zatěžující síla proměnlivá. Její velikost je závislá na odporu materiálu během tváření. Na počátku ohybu právě tento odpor roste z důvodu zvětšující se třecí síly a dále v důsledku zvětšujícího se deformačního odporu při rozšiřování zakončení trubky lemem či kuželem. V následujících kapitolách bude podrobně popsána geneze deformačního odporu pro zadané tvary zakončení.



Obr. 6: Vyznačení kritických míst [20]

2.1 Rozšiřování trubek do ploché příruby [1], [2], [16], [18], [20], [27]

Jedním z požadovaných tvarů rozšířené trubky je plochá příruha. Schéma tváření je znázorněné na obr. 7a. Zde jsou vyznačeny počáteční rozměry polotovaru, tedy poloměr trubky “ r_0 ” a tloušťka stěny “ t_0 ”, ale i výsledné rozměry příruby, jako je konečný poloměr “ R_V ”, poloměr ohybu “ r_m ” a konečná tloušťka hrany “ t_V ”.

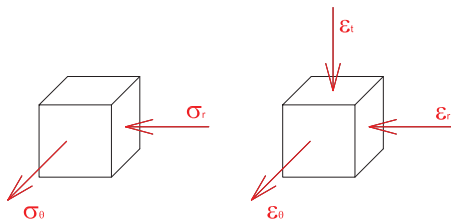
Jak bylo uvedeno v předešlé kapitole, v místě ohybu narůstá třecí složka síly. To zapříčiní zbrzdění materiálu, a tím i nárůst tloušťky stěny. Po překonání ohybové oblasti (při poloměru větším jak “ r ” – viz obr. 7a) se tloušťka příruby začíná zmenšovat. V určitém místě se její hodnota rovná počáteční tloušťce “ t_0 ”. Toto místo definuje neutrální poloměr “ R_N ”. Průběh změny tloušťky (obr. 7d) v oblasti mezi body 2-3 vyznačených na obr. 6 lze vyjádřit pomocí vztahu dle [2], [16]:

$$t_x = t_r \left(\frac{r}{R_x} \right)^{\frac{1+(\sigma_r/\sigma_\theta)}{2-(\sigma_r/\sigma_\theta)}}, \quad (2.1)$$

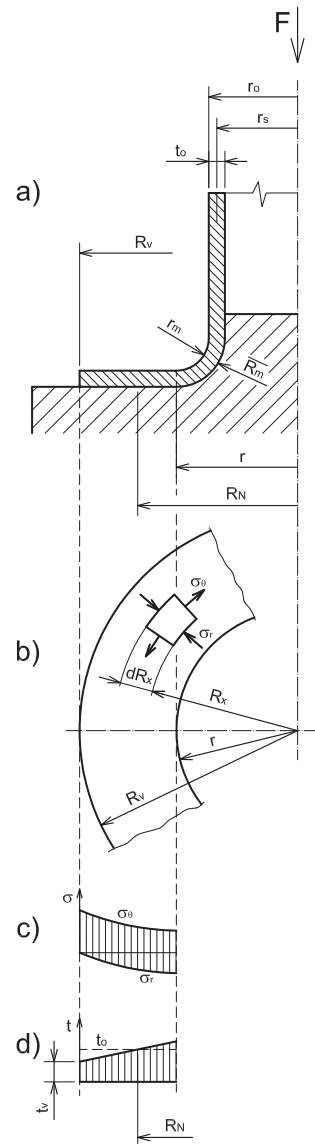
kde t_r je tloušťka stěny konce rádiusu,
 R_x označuje obecný poloměr příruby,
 σ_r je radiální napětí,
 σ_θ je obvodové tahové napětí.

2.1.1 Popis napěťově-deformačního vztahu [9], [16], [20], [21]

Na základě mechanického schématu deformace si lze představit směry hlavních napětí biaxiálního stavu, které jsou zobrazeny na obr. 8.



Obr. 8: Deformační schémata [20]



Obr. 7: Schéma tváření ploché příruby [9]

Cílem je řešení deformačního odporu tvářeného materiálu, který iniciuje vnější sílu “ F ” realizovanou např. hydraulickým lisem. Celkový deformační odpor se skládá z několika složek:

$$(\sigma_d)_c = (\sigma_r)_{max}^* + \sigma_o + \sigma_{\mu\alpha}, \quad (2.2)$$

kde “ $(\sigma_r)_{max}^*$ “ je největší hodnota radiálního napětí, “ σ_o “ je deformační napětí v důsledku ohybu a “ $\sigma_{\mu\alpha}$ “ je člen zohledňující vliv pásového tření v oblasti poloměru.

Jak již bylo uvedeno, na počátku ohybu narůstá tloušťka stěny a materiál je v plném kontaktu s lisovníkem. Z tohoto důvodu jsou členy rov.(2.2) ovlivněny pásovým třením. Výsledný deformační odpor pak je:

$$(\sigma_d)_c = [(\sigma_r)_{max}^* + \sigma_o] \cdot \sigma_{\mu\alpha}. \quad (2.3)$$

2.1.2 Rozbor jednotlivých složek deformačního odporu [8], [9], [16], [20], [21]

- Největší hodnota radiálního napětí “ $(\sigma_r)_{max}^*$ “
Pomocí podmínky rovnováhy sil na elementu vyznačeném v obr. 7b je získána obecná rovnice dle [8]:

$$\begin{aligned} \sum F &= R_x \cdot \sigma_r \cdot t_0 \cdot d\alpha - (R_x + dR_x) \cdot (\sigma_r + d\sigma_r) \cdot t_0 \cdot d\alpha + 2 \cdot \sigma_\theta \cdot \\ &\quad \cdot dR_x \cdot t_0 \cdot \sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) = 0. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Po zavedení zjednodušujících předpokladů a úpravě je rovnice zapsána ve tvaru:

$$\frac{d\sigma_r}{dR_x} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{R_x} = 0. \quad (2.5)$$

Z podmínky plasticity ($\sigma_\theta - \sigma_r = \sigma_k$) a zavedení okrajových podmínek $R_x = R_V \Rightarrow \sigma_r = 0$ jsou získány vztahy:

$$\sigma_r = -\sigma_k \cdot \ln \frac{R_V}{R_x}, \quad (2.6)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_k \left(1 - \ln \frac{R_V}{R_x}\right), \quad (2.7)$$

kde σ_k je napětí na mezi kluzu.

Průběhy “ σ_r “ a “ σ_θ “ jsou zobrazeny na obr. 7c.

Je třeba znát maximum radiálního napětí. Z rovnice (2.6) vyplývá, že pro maximum musí hodnota “ R_x “ být minimální, proto z tohoto důvodu je za “ R_x “ dosazeno “ r “:

$$(\sigma_r)_{max}^* = 1,1 \cdot \sigma_k \cdot \ln \frac{R_V}{r}. \quad (2.8)$$

V rovnici je využit korekční koeficient podmínek plasticity $\beta = 1,1$.

- Ohybové napětí “ σ_o “
Ohybové napětí je definováno vztahem:

$$\sigma_o = \frac{2 \cdot \sigma_k \cdot t_0}{4 \cdot r_m}. \quad (2.9)$$

- Pásové tření “ $\sigma_{\mu\alpha}$ “
Pásové tření je vyjádřeno vztahem dle Eulera takto:

$$\sigma_{\mu\alpha} = e^{\mu\alpha}, \quad (2.10)$$

kde μ je koeficient tření.

2.1.3 Určení síly

Ze základní definice napětí, kde síla působí na celou stykovou plochu trubky, vyplývá:

$$(\sigma_d)_c = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot t_0}, \quad (2.11)$$

přičemž “ r_s “ je poloměr středního vlákna trubky.

Při zohlednění rovnic (2.3) , (2.8), (2.9), (2.10), (2.11) je výsledná síla:

$$F = 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot t_0 \cdot \left[1, 1 \cdot \sigma_k \cdot \ln \frac{R_V}{r} + \frac{\sigma_k \cdot t_0}{2 \cdot r_m} \right] \cdot e^{\mu\alpha}. \quad (2.12)$$

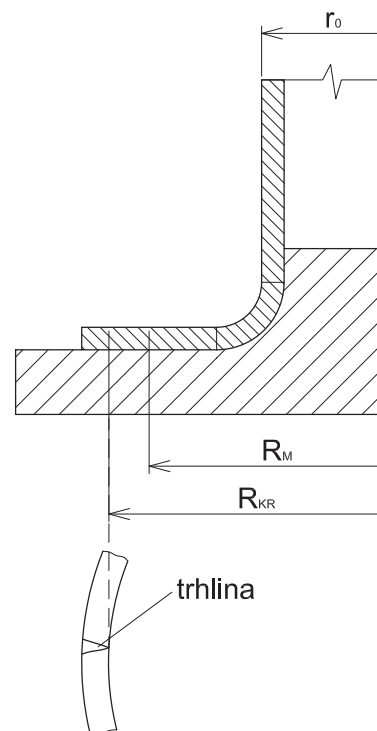
2.1.4 Zhodnocení

Výše uvedená analýza deformačního vztahu a výsledná rovnice pro stanovení síly je v určitém smyslu zidealizovaná, neboť je využito níže uvedených zjednodušujících předpokladů:

- u ohybu není uvažováno zpevnění materiálu
- je využita zjednodušující podmínka plasticity
- je izotropní materiál
- aproximace přirozeného deformačního odporu materiálu
- je využit jednotný součinitel tření
- rovnice (2.9) je velmi zjednodušená atd.

Verifikace těchto rovnic umožňuje experiment. Experiment zjistí nejen rozdíl mezi silou “ F “ vypočítanou a silou reálnou, ale také pomocí deformační sítě je možné určit reálné deformační schéma, a tím i reálné rozložení tloušťky v oblasti příruby a též tloušťku “ t_V “ na hraně příruby.

Experiment rovněž umožní zjistit kritický rozměr příruby, neboť lze deformovat přírubu až do počátku vzniku některého z defektů, kterým může být například příčná vlna nebo trhлина, jak je ukázáno na obr. 9. V předešlých kapitolách bylo uvažováno pouze “ R_V “, což je konečný poloměr příruby. Dále se však bude tato hodnota rozdělovat podle toho, zda se jedná o teoreticky vypočítaný poloměr anebo poloměr zjištěný experimentem. Poloměr “ R_{KR} “ značí maximálně možný rozměr příruby, který lze vyrobit, a rozměr “ R_M “ je vypočítaný mezní poloměr z plastických charakteristik materiálu a bude vždy menší než poloměr “ R_{KR} “. Na vzniku trhliny nebo na výskyt jiného z defektů, které budou předmětem jiné kapitoly, se především podílí drsnost hrany a vlastnosti materiálu, jako jsou pevnostní parametry (“ R_m “, “ $R_{p0,2}$ “) a plastické charakteristiky (“ A “, “ Z “, “ n “).

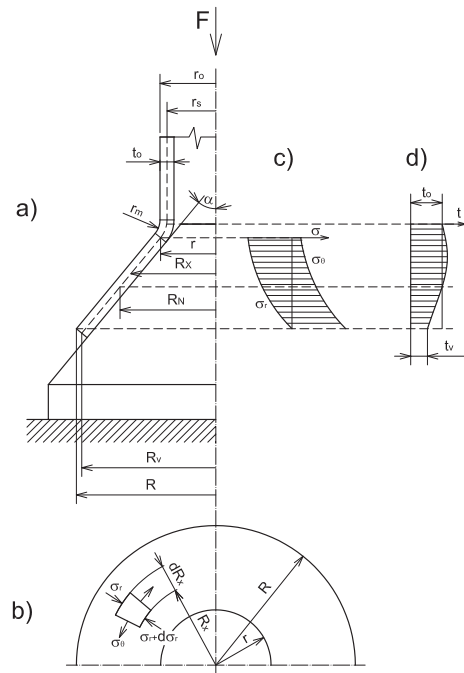


Obr. 9: Schéma tváření ploché příruby

2.2 Rozšiřování trubek do tvaru kužele [9], [10], [12], [20], [23]

Dalším možným způsobem, jak rozšiřovat trubky, je tvar kužele. Tento typ rozšiřování je znázorněn na obr. 10a, na kterém jsou popsány základní rozměry počátečního a konečného tvaru trubky, stejně jako u ploché příruby. Dále poloměry " r ", " R_N ", " R_V " jsou vztaženy k střednímu vlákně stěny trubky a úhel, který udává sklon rozšíření kužele, je označený " α ". Také tloušťka stěny se při tomto případě v průběhu tvarování mění. Průběh změny je vyznačen na obr. 10d a lze ji stanovit podle stejného vztahu (rov. 2.1) jako u ploché příruby.

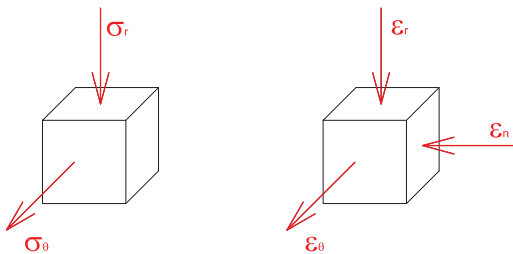
Pro určení potřebné síly na přetvoření je vhodné v tomto způsobu rozšiřování zahrnout i vliv tření působící mezi tvářeným materiálem a trnem v oblasti ohraničené body 2 a 3, jak bylo vyznačeno na obr. 6.



Obr. 10: Schéma tváření kuželové příruby [9]

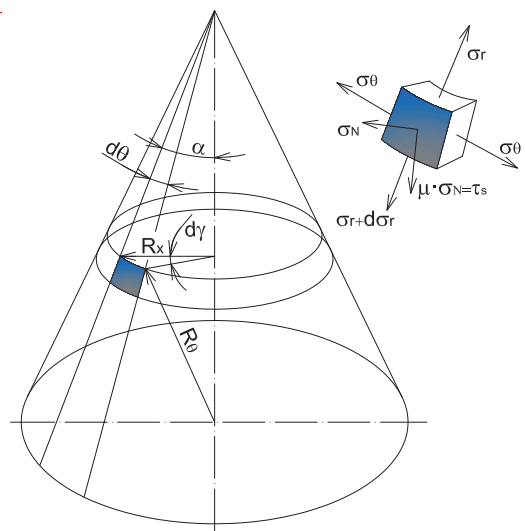
2.2.1 Popis napětově-deformačního vztahu [9], [16], [19], [20], [22]

Směry hlavních napětí a deformace při této technologii jsou znázorněny na obr. 11.



Obr. 11: Deformační schémata

Pro určení celkové síly je nutné nejprve určit maximální radiální napětí, které se stanovuje pomocí rozboru působících napětí na element kužele. Schéma geometrie elementu a působení jednotlivých napětí je znázorněno na obr. 12.



Obr. 12: Schéma geometrie elementu

Z rovnice rovnováhy elementu dle [16], [22], ve které se zohlední vliv tření na smykové ploše ($\tau_S = \mu \cdot \sigma_N$), vyplývá:

$$R_x \cdot \frac{d\sigma_r}{dR_x} + \sigma_r - \sigma_\theta - \frac{\mu \cdot \sigma_N \cdot R_x}{t \cdot \sin(\alpha)} = 0. \quad (2.13)$$

S použitím zatížení dílce normálovým tlakem lze využít rovnice Laplace-ho:

$$\frac{\sigma_N}{t} - \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} - \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} = 0, \quad (2.14)$$

vzhledem k tomu, že kužel má $R_\rho = \infty$, tak poté lze z rovnice (2.14) získat vztah:

$$\frac{\sigma_\theta}{R_\theta} = \frac{\sigma_N}{t}. \quad (2.15)$$

Řešením rovnic (2.13) a (2.15), s použitím podmínky plasticity $\sigma_\theta - \sigma_r = \sigma_k$, jsou získány:

$$\sigma_r = -\sigma_k \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{R_x}{R_V}\right)^{\mu \cdot \operatorname{cotg} \alpha}\right], \quad (2.16)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_k \cdot \left\{1 - \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{R_x}{R_V}\right)^{\mu \cdot \operatorname{cotg} \alpha}\right]\right\}. \quad (2.17)$$

K zjištění celkového deformačního odporu “ $(\sigma_d)_c$ “ je důležité určit radiální napětí “ σ_r “ a složku ohybového napětí “ σ_o “. Je třeba též nalézt maximální hodnotu radiálního napětí. Radiální napětí je závislé na poloměru “ R_x “, tudíž maximální hodnoty tato složka dosahuje v případě, že platí $R_x = r$ (viz obr. 10b).

Na základě výše uvedené rovnice (2.16) vztah pro radiální napětí zní takto:

$$(\sigma_r)_{max} = -\sigma_k \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R_V}\right)^{\mu \cdot \operatorname{cotg} \alpha}\right]. \quad (2.18)$$

Rovnice ohybového napětí je následující:

$$\sigma_o = \frac{\sigma_k \cdot t}{2 \cdot r_m + t}. \quad (2.19)$$

Pokud je uvažováno upřesnění výpočtu pak je vhodné brát v úvahu zpevnění materiálu. Proto se mez kluzu “ σ_k “ nahradí střední hodnotou přirozeného deformačního napětí, která je zapsána pomocí lineární aproximace ve tvaru:

$$(\bar{\sigma})_{str} = \sigma_{ke} + \frac{D}{2} \cdot \left(\frac{R_V - r}{r}\right), \quad (2.20)$$

kde σ_{ke} je extrapolovaná mez kluzu a D je modul zpevnění.

Extrapolovaná mez kluzu a modul zpevnění lze vypočítat pomocí známých materiálových konstant “ K “ a “ n “ podle následujících vztahů:

$$\sigma_{ke} = \frac{1 - n}{1 + n} \cdot K \cdot n^n, \quad (2.21)$$

$$D = \frac{2}{1 + n} \cdot K \cdot n^n. \quad (2.22)$$

Za použití rov. (2.18), (2.19) a (2.20) je možné celkový deformační odpor zapsat takto:

$$(\sigma_d)_c = \left[\sigma_{ke} + \frac{D}{2} \left(\frac{R_V - r}{r} \right) \right] \left(1 + \frac{\text{tg } \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R_V} \right)^{\mu \cdot \text{cotg } \alpha} \right] + \frac{\sigma_k \cdot t_0}{2 \cdot r_m + t_0} \quad (2.23)$$

Zpřesnění lze využít i při rozšiřování trubek do ploché příruby tak, že se v rovnici (2.8) nahradí mez kluzu “ σ_k “ střední hodnotou přirozeného přetvárného odporu “ $(\bar{\sigma})_{str}$ “.

2.2.2 Určení síly

Pomocí rovnice pro celkový deformační odpor (2.23) a rovnice (2.11) bude určena potřebná síla na přetvoření trubky a její výsledný tvar je:

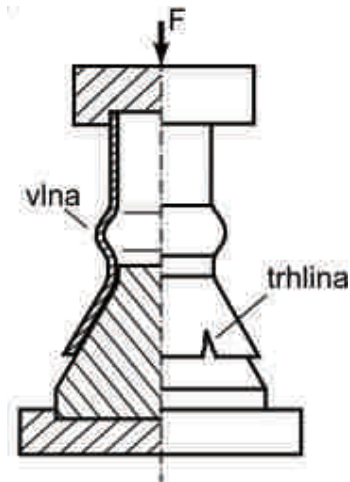
$$F = \left\{ \left[\sigma_{ke} + \frac{D}{2} \left(\frac{R_V - r}{r} \right) \right] \left(1 + \frac{\text{tg } \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R_V} \right)^{\mu \cdot \text{cotg } \alpha} \right] + \frac{\sigma_k \cdot t_0}{2 \cdot r_m + t_0} \right\} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_S \cdot t_0 \quad (2.24)$$

2.3 Technologické defekty při tváření [20], [23], [27]

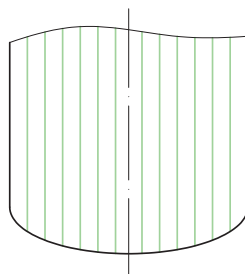
Během samotného procesu tváření se mohou vyskytnout různé druhy defektů na finálním tvaru. Těmito defekty jsou například:

- Vznik trhliny na poloměru “ R_V “ (viz obr. 13)

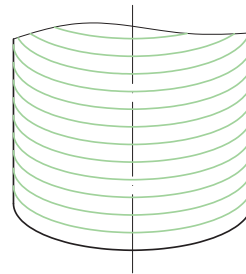
Nejčastěji dochází ke vzniku trhliny vlivem velkého ztenčení stěn trubek. Průběh změny tloušťky při tváření byl popsán v předchozích kapitolách. Další příčinou může být kvalita povrchu (drsnost) hrany. Čím se kvalita povrchu zhoršuje, tím je větší pravděpodobnost výskytu vrubu, který může iniciovat trhlínu. Vliv na to, jaký vznikne výsledný konečný poloměr, má i směr vláken materiálu. Je rozdíl mezi vlákny jdoucími po délce trubky (obr. 14a) a vlákny po obvodu trubky (obr. 14b). Materiál s vlákny po délce trubky je daleko náchylnější na vznik trhliny.



Obr. 13: Vyznačení nejčastějších defektů [20]



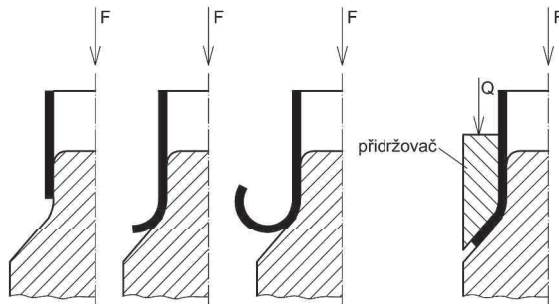
(a)



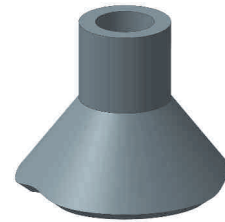
(b)

Obr. 14: Směr vláken materiálu

- Ztráta vzpěrné stability
V tomto případě se ztráta vzpěrné stability projevuje vznikem příčné vlny (obr. 13). Jde o stav, ve kterém deformační odpor pro tvorbu kužele je větší než odpor trubky proti vzniku vlny.
- Zpětné zakroužení konce trubky
Zpětné zakroužení konce trubky spočívá v odchýlení materiálu do trnu. Názorně lze tento jev pozorovat na obrázku 15. Této vlastnosti lze předcházet použitím přídržovače. Na druhé straně to v některých případech může být i cílem výroby.



Obr. 15: Průběh zpětného zakroužení konce trubky

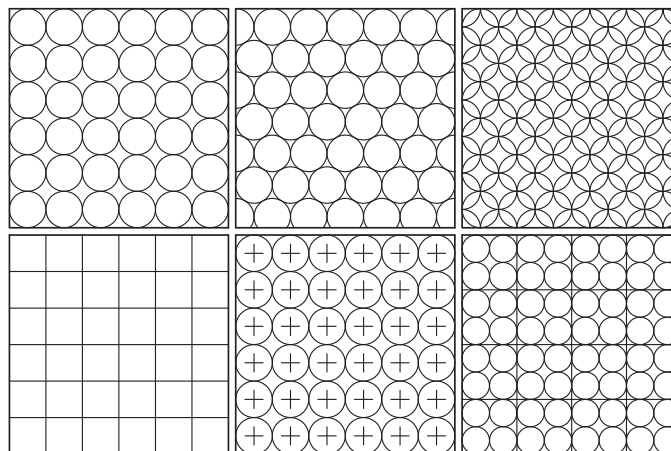


Obr. 16: Nepravidelný konec trubky

- Nepravidelný konec tvářené trubky
Nastane-li na stykové ploše mezi materiálem a trnem rozdílné tření vlivem nerovnoměrného mazání, materiál se nepravidelně přemísťuje a vzniká tvar znázorněný na obr. 16

2.4 Problematika deformačních sítí [5], [7], [13], [14], [15], [19]

Za pomoci deformačních sítí, které se nanášejí na povrch trubky, je možné určit průběh deformace v určité oblasti výlisku a potažmo i ukazatel stavu biaxiální napjatosti $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$. Umožňují stanovit deformační schéma ve vybraných bodech a určit tloušťky v těchto místech výlisku. Deformační síť může mít mnoho tvarů. Příklady některých z nich jsou znázorněny na obr. 17.



Obr. 17: Příklady deformačních sítí [7]

Nejčastějším typem je kruhová síť, která se při deformaci změní na elipsy. Pro vyhodnocení je třeba provést proměření rozměrů elementu před deformací a po ní a vypočítat poměrné deformace podle vztahů:

$$\varepsilon_1 = \frac{l_1 - d_0}{d_0}, \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{l_2 - d_0}{d_0}. \quad (2.26)$$

Pro přehlednost jsou rozměry “ l_1 “, “ l_2 “ a “ d_0 “ vyznačeny v obr. 18. Z poměrných deformací lze dále určit logaritmické deformace, a to za pomoci vztahu:

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon). \quad (2.27)$$

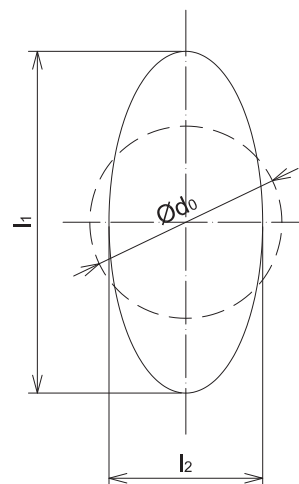
Díky zákonu zachování objemu, ze kterého vyplývá, že $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$, je možné napsat:

$$\varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2. \quad (2.28)$$

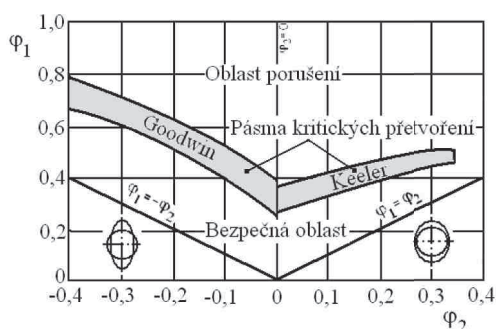
Hodnotu “ φ_3 “ je nutné znát pro stanovení tloušťky stěny v určitém bodě. Napětí lze vypočítat s využitím upravené Lévy-Misesiho rovnice:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{2 \cdot \varphi_2 + \varphi_1}{2 \cdot \varphi_1 - \varphi_2}. \quad (2.29)$$

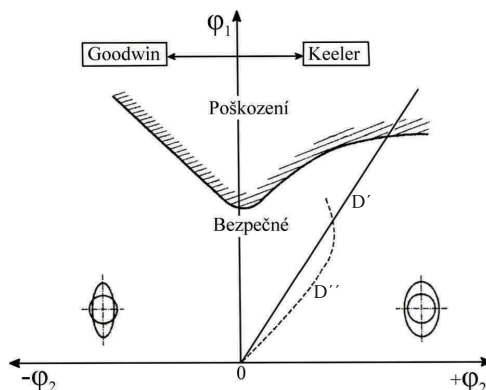
Dalším využitím výsledků z proměřené deformované sítě je vytvoření reálné deformační stopy zanesené do Keeler-Goodwinova diagramu (obr. 19). Chybně se uvažuje, že deformační stopa má lineární charakter znázorněný v obr. 20 přímkou “ D' “. V praxi je ale prokázán jiný průběh deformační stopy viz křivka “ D'' “.



Obr. 18: Rozměry elementu sítě [19]



Obr. 19: Keeler-Goodwinův diagram [15]



Obr. 20: Vyznačení deformačních stop [19]

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE [6], [11]

- Zvolení technologie

Pro realizaci experimentu byly zvoleny technologie rozšiřování dílce do plochého lemu a do kužele. Důvodem volby obou technologií je jejich vzájemná odlišnost. Metoda rozšiřování do kužele byla zvolena z důvodu, že při ní dochází k rozměrově většímu ohnisku deformace než u dílu s plochým lemem. Oproti tomu, na tvorbu plochého lemu má daleko větší vliv rádius " r_m ", na něm závislé ohybové napětí " σ_o " a větší deformační odpory, které mohou vést k vytvoření příčné vlny.

- Definice materiálu

Experiment bude proveden s materiálem 1.4301 (17 240). Jedná se o chrom-niklovou austenitickou korozivzdornou ocel. Je jednou z nejpoužívanějších korozivzdorných ocelí, která má dobrou tažnost za studena a při tváření může zpevňovat. Mezi další vlastnosti tohoto materiálu patří dobrá svařitelnost.

Chemické složení oceli¹ je přehledně zaznamenáno v tabulce 1.

Tab. 1: Chemické složení materiálu 1.4301

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
max. 0,07	max. 2,0	max. 1	17,0 až 20,0	9,0 až 11,5	max. 0,045	max. 0,03

Mechanické vlastnosti získané z normy ČSN 14 7240 jsou uvedené v tab. 2.

Tab. 2: Mechanické vlastnosti materiálu 1.4301

Mez kluzu	$R_{p0,2}$	186 MPa
Mez pevnosti	R_m	490 MPa až 686 MPa
Nejmenší tažnost	A	40 %

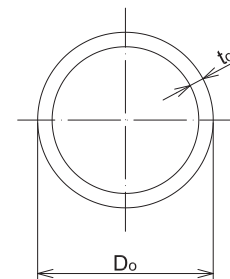
Materiálové konstanty jsou zapsány v tab. 3.

Tab. 3: Materiálové konstanty

Součinitel zpevnění	n	0,417
Materiálová konstanta	K	1852,6 MPa

- Geometrie vzorku

Polotovar je kruhová svařovaná trubka o vnějším průměru " D_0 " 40 mm a tloušťce " t_0 " 1,5 mm (obr. 21). Dodávaná délka polotovaru je 2 m. Vzorky z trubky jsou děleny na požadovanou délku pomocí soustruhu z důvodu docílení požadované drsnosti (jak bylo uvedeno v předchozí kapitole 2.3, jakost hrany ovlivňuje vznik trhliny). Délka vzorku je pro jednotlivé technologie odlišná, proto bude trubka nadělena na dvě různé délky. Poté musí být geometrie vzorku důkladně proměřena. Předmětem kontroly je skutečná tloušťka stěny a kruhovitost. Z výsledných hodnot kruhovitosti poté usoudí, kde je nutná kalibrace trubky. Dalším znakem o vzorku je směr vláken, který je orientován po délce. Podélné



Obr. 21: Geometrie vzorku

¹Uvedené hodnoty jsou v %

uspořádání vláken vzorku znázorněné na obr. 14a je méně vhodné pro technologii rozšiřování.

- Návrh nástroje
Při návrhu nástroje musí být zváženy všechny možnosti konstrukce a geometrie, zejména jestli je nástroj z jednoho kusu, nebo je dělený. Musí být také zajištěno dobré mazání a snadné sejmutí výlisku z nástroje.
- Provedení experimentu a jeho vyhodnocení
Experimenty představují postupné nasouvání trubky na trn nástroje s následnou tvorbou zakončení vzorků. Jako zdroj tlakové síly lze využít trhací stroj umožňující záznam síly, čili $F = f(\text{zhvihu příčnicku})$. Po experimentu následuje vyhodnocení deformačního toku materiálu, respektive vyhodnocení napěťového stavu.
- Konfrontace teoretických výpočtů deformačního odporu či tvářecí síly s reálnými hodnotami síly potřebné pro tvarování konců.
- Zhodnocení výsledků.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Následující kapitola zahrnuje kromě samotného provedení experimentu i vyhodnocení výsledků a bude zde popsána i jeho příprava a výpočet teoretických hodnot, které se následně porovnají s naměřenými výsledky.

4.1 Plánování experimentu

Důkladné naplánování je jedním z předpokladů pro bezproblémový průběh experimentu a správnost výsledků. Jednotlivé kroky práce při přípravě experimentu a jeho samotné provedení jsou realizovány podle následujícího postupu:

- Příprava vzorku
 - určení délky a dělení polotovaru na požadovaný rozměr
 - proměření rozměrů
 - nanesení deformační sítě
- Návrh nástroje a výroba dle výkresové dokumentace
- Provedení experimentu
 - nanesení mazadla na nástroj
 - nalisování vzorku na nástroj a sledování průběhu tváření
 - * lisování vzorku je ukončováno v odlišných, předem stanovených, krocích
 - vyhodnocení výsledku
 - porovnání s teoretickými hodnotami

4.1.1 Určení délky vzorku [8]

K určení potřebné délky polotovaru je důležité zjistit konečný poloměr příruby “ R_M ” (viz obr. 9). Jeho velikost, to znamená zvětšení původního rozměru, se shoduje s prodloužením krajního vlákna, které odpovídá např. mezi pevnosti. Výpočet je proveden pomocí materiálových charakteristik s využitím aproximační křivky (obr. 22) popsané Ludwig-Holomonovým vztahem:

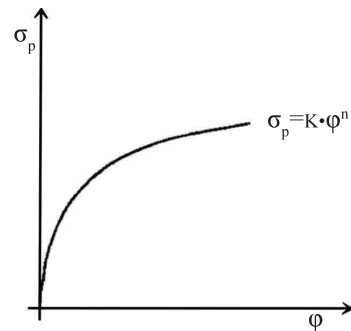
$$\sigma_p = K \cdot \varphi^n. \quad (4.1)$$

Exponent zpevnění “ n ” je materiálová konstanta a jeho hodnota se rovná plastické logaritmické deformaci “ φ_M ” na mezi pevnosti. Poměrnou deformaci lze vypočítat ze vztahu:

$$\varepsilon_M = e^{\varphi_M} - 1 = e^n - 1 = e^{0,417} - 1 = 0,517. \quad (4.2)$$

Hodnota “ ε_M ” umožňuje zjistit velikost prodloužení středního průměru trubky “ $(D_0)_{stř}$ ” (jemu odpovídá rozvinutá délka “ l_0 ”) oproti vnějšímu průměru příruby “ D_M ” (jemu odpovídá rozvinutá délka “ l ”).

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\Delta l}{\pi \cdot (D_0)_{stř}} \Rightarrow \Delta l = \varepsilon_M \cdot \pi \cdot (D_0)_{stř} = 0,517 \cdot \pi \cdot 38,5 = 62,53 \text{ mm} \quad (4.3)$$



Obr. 22: Aproximační křivka dle Ludwig-Holomona [8]

Z rozdílu konečné a počáteční délky středního vlákna vzorku je možné konečný průměr, resp. poloměr příruby, stanovit z rovnice:

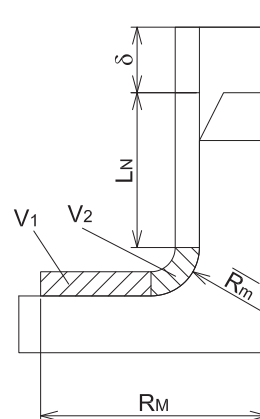
$$\Delta l = l - l_0 = \pi D_M - \pi (D_0)_{stř} \Rightarrow D_M = \frac{\Delta l + \pi (D_0)_{stř}}{\pi} = \frac{62,53 + \pi 38,5}{\pi} = 58,40 \text{ mm} \Rightarrow \\ \Rightarrow R_M = 29,20 \text{ mm}. \quad (4.4)$$

- Výpočet délky vzorku pro plochou přírubu
Při výpočtu délky vzorku je uvažováno zachování objemu tvářeného materiálu $V_{poč} = V_{kon}$, “ $V_{poč}$ “ je označován počáteční objem a “ V_{kon} “ objem konečného dílce.

$$V_{poč} = V_{kon}$$

$$\frac{1}{4} \pi \Delta \left[D_0^2 - (D_0 - 2t_0)^2 \right] = V_1 + V_2 \quad (4.5)$$

V tomto vzorci představuje “ Δ “ potřebnou délku vzorku nutnou pro vytvoření lemu do mezního poloměru “ R_M “ včetně ohybové části.



Obr. 23: Schéma pro výpočet délky vzorku ploché příruby

Na obr. 23 jsou vyznačeny oblasti odpovídající objemům částí příruby V_1 a V_2 . Objem V_1 lze vypočítat ze vztahu:

$$V_1 = \left[\pi R_M^2 - \pi \left(\frac{D_0}{2} + r_m \right)^2 \right] t_0 = \left[\pi 29,20^2 - \pi \left(\frac{40}{2} + 2,5 \right)^2 \right] 1,5 = \quad (4.6) \\ = 1632,3 \text{ mm}^3.$$

Objem V_2 se stanoví pomocí vzorce pro jednu čtvrtinu anuloidu tímto výpočtem:

$$V_2 = \frac{2}{4} \pi^2 \left(\frac{D_0}{2} + r_m \right) \left(R_m^2 - r_m^2 \right) = \frac{2}{4} \pi^2 \left(\frac{40}{2} + 2,5 \right) \left(4^2 - 2,5^2 \right) = \quad (4.7) \\ = 1082,57 \text{ mm}^3.$$

Výsledky rovnic (4.7), (4.8) jsou dosazeny do vzorce (4.5), ze kterého lze určit výsledné “ Δ “.

$$\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \Delta \cdot \left[D_0^2 - (D_0 - 2 \cdot t_0)^2 \right] = V_1 + V_2$$

$$\Delta = \frac{4(V_1 + V_2)}{\pi \left[D_0^2 - (D_0 - 2 \cdot t_0)^2 \right]} = \frac{4(1632,3 + 1082,57)}{\pi \left[40^2 - (40 - 2 \cdot 1,5)^2 \right]} = 14,96 \text{ mm} \quad (4.8)$$

Celková délka polotovaru “ L_C “ je pak součtem nutné délky vzorku pro vytvoření lemu do mezního poloměru “ Δ “, délky nástroje “ L_N “ a přídatku na délku polotovaru “ δ “.

$$L_C = \Delta + L_N + \delta = 14,96 + 80 + 15 = 109,96 \text{ mm} \quad (4.9)$$

- Výpočet délky vzorku pro kuželové rozšíření

U výpočtu délky polotovaru pro kuželové rozšíření je postup analogický jako u ploché příruby. Jediná odlišnost je v geometrii nástroje, a proto jsou výpočtové vztahy objemů “ V_1 ” a “ V_2 ” (obr. 24) rozdílné. Pro výpočet objemu “ V_1 ” a “ V_2 ” je třeba nejprve určit střední průměr trubky či odpovídající poloměr “ r ”.

$$r = \frac{D_0 - t_0}{2} + \left(r_m + \frac{t_0}{2} \right) (1 - \cos \alpha) \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} r &= \frac{40 - 1,5}{2} + \left(5 - \frac{1,5}{2} \right) (1 - \cos 30) = \\ &= 19,82 \text{ mm} \end{aligned}$$

Objem kuželové části “ V_1 ” je poté stanoven následovně:

$$V_1 = \pi t \left(R_M^2 - r^2 \right) \frac{\operatorname{tg}(90 - \alpha)}{\cos(\alpha)} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} V_1 &= \pi 1,5 \left(29,20^2 - 19,82^2 \right) \frac{\operatorname{tg}(90 - 30)}{\cos(30)} = \\ &= 4333,58 \text{ mm}^3. \end{aligned}$$

Objem “ V_2 ” je vypočítán vztahem:

$$V_2 = \frac{\alpha \cdot 2}{360} \pi^2 \left(\frac{D_0}{2} + r_m \right) \left(\overline{R_m^2} - r_m^2 \right) \quad (4.12)$$

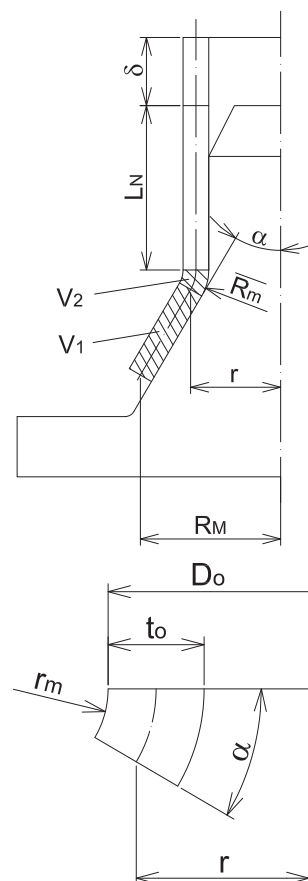
$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{30 \cdot 2}{360} \pi^2 \left(\frac{40}{2} + 3,5 \right) \left(5^2 - 3,5^2 \right) = \\ &= 492,86 \text{ mm}^3. \end{aligned}$$

Výsledky rovnic (4.12), (4.13) jsou dosazeny do vzorce (4.8), ze kterého lze určit výslednou hodnotu “ Δ ”.

$$\Delta = \frac{4(V_1 + V_2)}{\pi \left[D_0^2 - (D_0 - 2 \cdot t_0)^2 \right]} = \frac{4(4333,58 + 492,86)}{\pi \left[40^2 - (40 - 2 \cdot 1,5)^2 \right]} = 26,60 \text{ mm}$$

Celková délka polotovaru “ L_C ” je pak součtem nutné délky vzorku pro vytvoření lemu do mezního poloměru “ Δ ”, délky nástroje “ L_N ” a přídatku na délku polotovaru “ δ ”.

$$L_C = \Delta + L_N + \delta = 26,60 + 80 + 15 = 121,60 \text{ mm}$$



Obr. 24: Schéma pro výpočet délky vzorku kuželové příruby

Výsledné hodnoty délek vzorku pro jednotlivé případy rozšiřování jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4: Rozměry vzorků

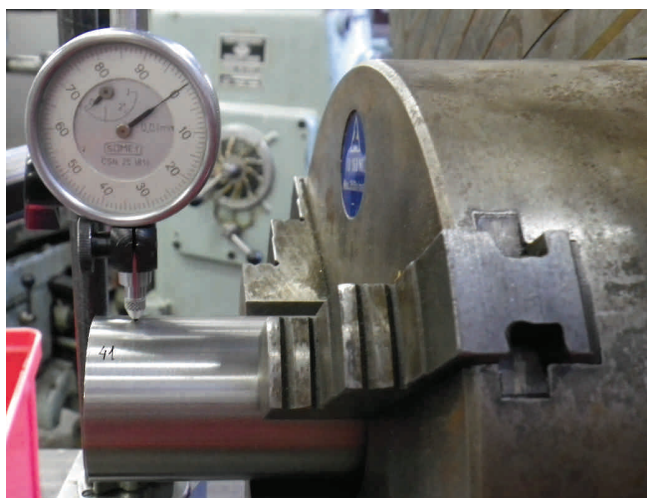
způsob rozšiřování	D_0 [mm]	t_0 [mm]	L_C [mm]
plochá příruba	40	1,5	109,96
kuželová příruba	40	1,5	121,60

4.1.2 Proměření polotovaru

Před vstupem do procesu tváření byly jednotlivé vzorky označeny a proměřeny.

- Proměření kruhovitosti

Vzorek byl upnut do sklíčidla upevněného na otočný přípravek s úhlovou stupnicí. Volný konec vzorku byl snímán úchylkoměrem (měřicími hodinkami) s rozlišitelností 0,01 mm. Uspořádání sestavy měřícího přístroje a vzorku je znázorněno na obr. 25.



Obr. 25: Uspořádání měření kruhovitosti



Obr. 26: Vyznačení měřených míst

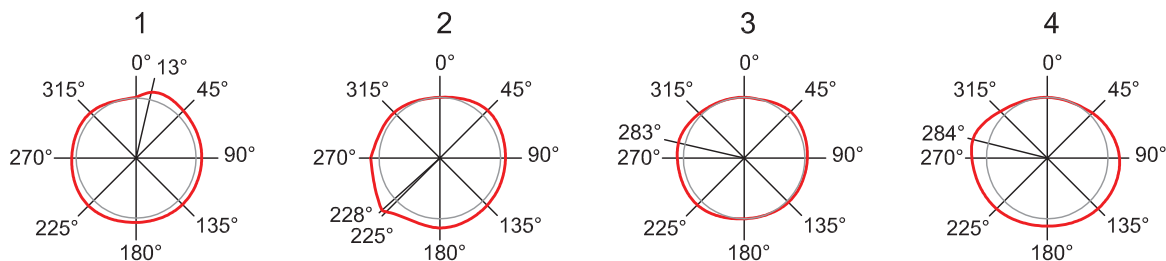
Nulová hodnota (počátek měření) byla nastavena v nejnižší (záporné) hodnotě. Od tohoto místa po 45° byly naměřeny odchylky a spolu s tím byla i tato místa označena (obr.26). Dále byla určena maximální odchylka a její poloha. Z každé série byly vybrány 4 vzorky lišící se pouze délkou dle použitého způsobu rozšiřování. Výsledky byly zapsány do tab. 5 a tab.6.

Z naměřených hodnot byly sestaveny diagramy zobrazující kruhovitosť jednotlivých vzorků. Pro lepší znázornění jsou velikosti odchylek 10x zvětšeny (obr. 27, obr. 28).

Tab. 5: Výsledky měření kruhovitosti pro plochou přírubu ¹

č. vzorku	naměřené hodnoty								maximální hodnota	
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	odchylka	úhel
1	0	0,1	0,08	0,08	0,06	0,11	0,06	0,06	0,11	225°, 13°
2	0	0,11	0,08	0,1	0,15	0,25	0,14	0,06	0,28	228°
3	0	0,08	0,04	0,03	0	0,09	0,1	0,04	0,11	283°
4	0	0,05	0,19	0,18	0,12	0,18	0,24	0,09	0,26	284°

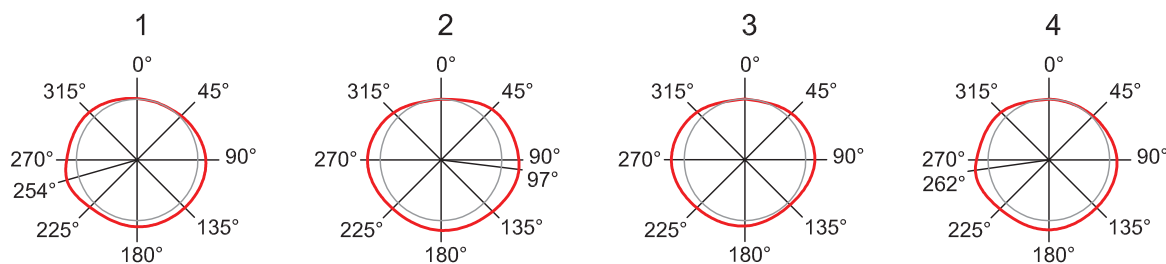
¹Uvedené hodnoty odchylek jsou v mm



Obr. 27: Znázornění naměřené kruhovitosti vzorků, plochá příruba

Tab. 6: Výsledky měření kruhovitosti pro kuželovou přírubu²

č. vzorku	naměřené hodnoty								maximální hodnota	
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	odchylka	úhel
1	0	0,02	0,13	0,11	0,1	0,1	0,16	0,11	0,2	254°
2	0	0,18	0,28	0,2	0,16	0,13	0,21	0,1	0,29	97°
3	0	0,08	0,15	0,05	0,09	0,12	0,21	0,11	0,21	270°
4	0	0,01	0,12	0,11	0,15	0,14	0,19	0,11	0,22	262°



Obr. 28: Znázornění naměřené kruhovitosti vzorků, kuželová příruba

- Měření tloušťky stěny vzorku

Ve vyznačených místech z předchozího měření kruhovitosti byla proměřena tloušťka stěny vzorku. Měření bylo provedeno na 4 vzorcích v 8 bodech. Každé vyznačené místo bylo proměřeno 3krát a z naměřených hodnot byly vypočítány střední hodnoty pomocí aritmetického průměru. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 2 a střední hodnoty jsou zapsány v tab. 7, tab. 8:

Tab. 7: Střední hodnoty tloušťky stěny vzorků pro plochou přírubu²

č. vzorku	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1	1,4	1,42	1,39	1,4	1,41	1,41	1,43	1,43
2	1,41	1,4	1,4	1,43	1,4	1,4	1,43	1,43
3	1,41	1,42	1,43	1,42	1,4	1,41	1,41	1,4
4	1,42	1,42	1,41	1,4	1,39	1,41	1,43	1,39

²Uvedené hodnoty odchylek jsou v *mm*

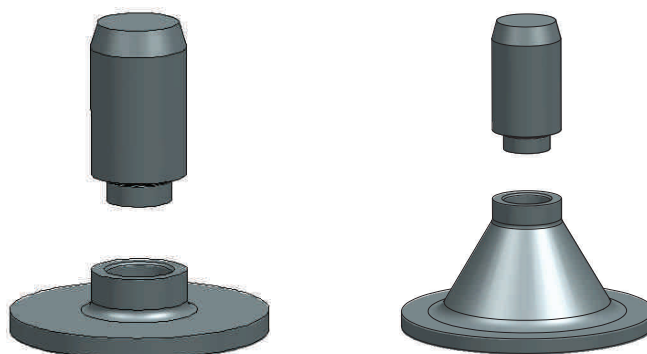
Tab. 8: Střední hodnoty tloušťky stěny vzorků pro kuželovou přírubu³

č. vzorku	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1	1,4	1,41	1,41	1,41	1,42	1,39	1,41	1,4
2	1,39	1,41	1,41	1,41	1,42	1,42	1,41	1,4
3	1,41	1,4	1,41	1,42	1,42	1,42	1,42	1,4
4	1,4	1,4	1,41	1,42	1,43	1,39	1,4	1,4

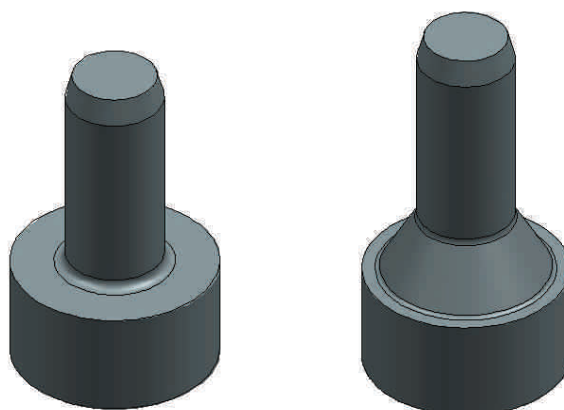
Ze všech naměřených hodnot tloušťky stěn vzorků byla stanovena střední hodnota. Pro následující výpočty bude tato střední hodnota brána jako počáteční tloušťka “ t_0 “, a tedy $t_0 = 1,42 \text{ mm}$.

4.1.3 Návrh nástroje

Během vývoje konstrukce nástroje bylo navrženo více variant. První varianta brala v úvahu dělitelnost nástroje, která by umožňovala testovat vzorky o stejném průměru, ale s jiným rádiusem “ r_m “ a odlišným úhlem sklonu příruby. Horní část nástroje by byla jednotná pro všechny případy. Dolní část by se lišila právě rádiusem a konečným tvarem příruby. Tato konstrukce by byla finančně výhodnější pro větší tvarovou škálu výlisků. Konkrétní uspořádání nástroje je znázorněno na obr. 29.

**Obr. 29:** Nástroj ze dvou částí

Jelikož bylo stanoveno, že experiment bude proveden pro každý případ tváření pouze s jedním rádiusem nástroje “ \overline{R}_m “, byla varianta rozděleného nástroje zavržena. Proto byl navržen nástroj z jednoho kusu (obr. 30).

**Obr. 30:** Nástroj z jedné části

³Uvedené hodnoty odchylek jsou v mm

Z předešlého měření kruhovitosti vzorku vyplývá, že je nutná kalibrace průměru. Z tohoto důvodu je v horní části nástroje tedy trnu umístěna kalibrační část. Aby bylo možné vzorek z nástroje po lemování lépe sejmout, tak musí být průměr trnu pod kalibrační část menší. Pak nedochází ke kontaktu mezi vzorkem a nástrojem. Před rádiusem " \overline{R}_m " je pozvolný návrat rozměru trnu na původní průměr. Dále byla vytvořena v kalibrační části drážka, která slouží k mazání (obr. 31), jež se spolu s válcovou částí o menším průměru před tvářením vyplní mazadlem. To zaručí dobré mazání během procesu. Konečný tvar nástroje je na obr. 32 a výkresová dokumentace je v příloze.



Obr. 31: Detail kalibrační části



Obr. 32: Nástroj konečný tvar

4.1.4 Nanesení deformační sítě [17]

Na připravené a proměřené vzorky byly naneseny kružnicové deformační sítě o průměru $d_0 = 2 \text{ mm}$. Pro nanesení sítě bylo použito elektrolytické leptání. Princip této metody spočívá ve vyleptávání deformační sítě na povrch trubky pomocí elektrochemické reakce elektrolytu. Vzorek je upnut ve speciálním přípravku, který je připojen ke zdroji elektrického napětí. Trubka se odvaluje po šabloně



Obr. 33: Deformační síť

s kružnicovou deformační sítí. Pod šablonou je umístěna tkanina namočená v elektrolytu. Během odvalování propouští šablona elektrolyt jen v místech nanesené sítě. Po očištění trubky od elektrolytu je získán vzorek s nanesenou deformační sítí viz obr. 33.

4.2 Provedení experimentu

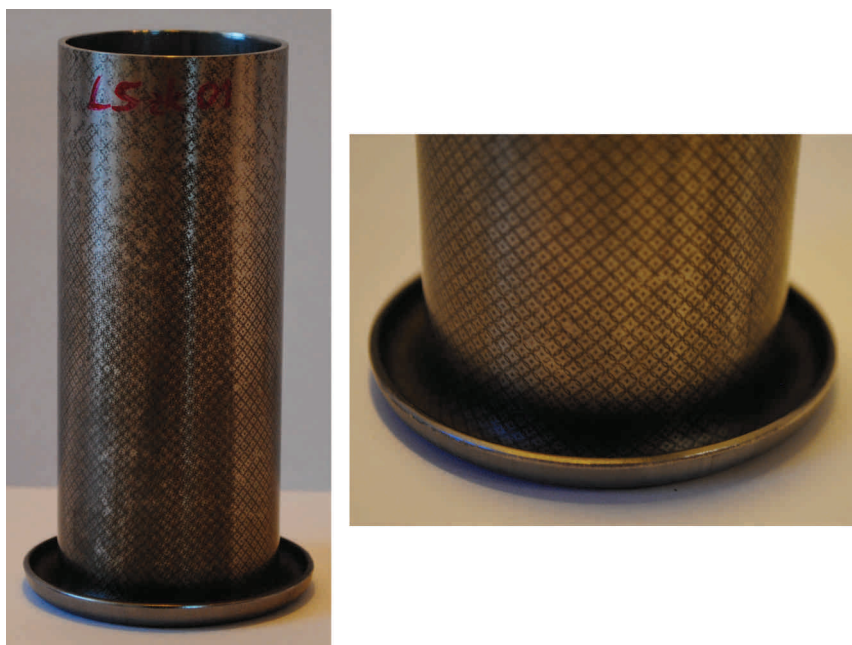
Před provedením testu byl vzorek i nástroj očištěn (zbaven výrobních nečistot). Povrch nástroje a vnitřní stěna vzorku byla pokryta mazadlem PRESSPATE SEM 95/800 od firmy Klüber Lubrication. Poté byl vzorek nasunut na nástroj a celá sestava byla vložena do zkušebního stroje viz obr. 34. Jako zkušební stroj byl zvolen hydraulický stroj ZD40 s měřícím rozsahem síly $8 \div 400 \text{ kN}$. Celý jeho popis je k nahlédnutí v příloze 3. Stroj je zdrojem vertikální síly působící na vzorek, který se následně lisuje podle geometrie trnu. Během procesu tváření byl zaznamenáván průběh zatěžující síly v závislosti na dráze.



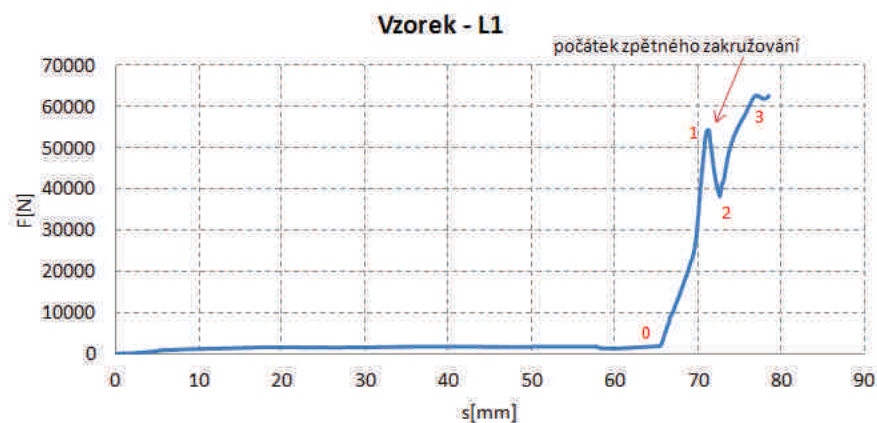
Obr. 34: Proces tváření

4.2.1 Experiment - výroba ploché přírubby

Při pozorování průběhu tváření bylo zjištěno, že místo tvorby plochého lemu dochází ke zpětnému zakroužení (obr. 35). Tento vzorek byl označen jako L1. Průběh zatěžující síly je zaznamenán na obr 36.

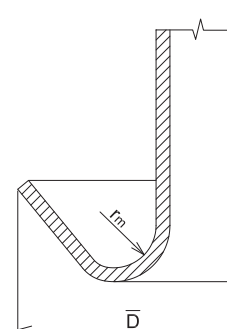


Obr. 35: Vzorek - L1



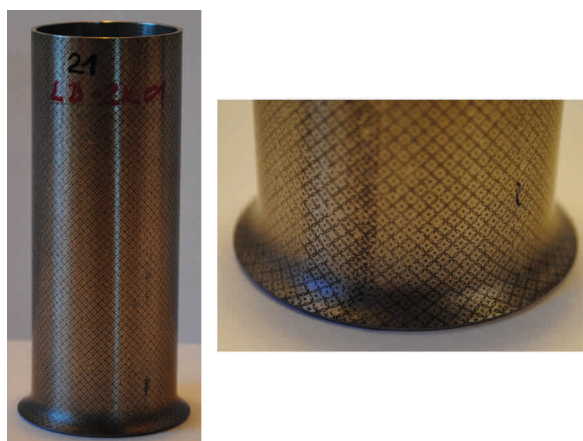
Obr. 36: Vzorek - L1: Průběh zatěžující síly

Ze závislosti síly na dráze (obr. 36) je možné vidět úsek od počátku do bodu 0, kde ještě nedochází k tvorbě příruby. Tato část zachycuje kalibraci trubky. Pro další vzorky kalibrační úsek nebude vykreslen. Dále následuje lokální maximum síly (bod 1). Tento lokální extrém zřejmě odpovídá úseku, kdy se materiál odlepí od lisovníku. Energie potřebná k vytvoření počátku zakroužení je pravděpodobně menší než energie kterou by bylo třeba vynaložit k tvorbě ploché příruby. Příčiny následného navýšení síly mezi body 2 a 3 jsou spekulativní. Závisí zřejmě na tvaru zakroužení, kde dochází k postupnému zvětšování průměru \bar{D} (obr. 37).



Obr. 37: Schéma zakroužení

Jedním z vysvětlení, proč tento jev vzniká, byla špatná výroba nástroje. Zjistilo se, že vyrobený rádius je částečně zapuštěn do ploché části trnu. A tedy v přechodové části nástroje je prohlubeň, která by mohla způsobovat nežádoucí tvar výlisku. Po opravě nástroje byl test zopakován, ale náchylnost výlisku na zakroužení zůstala stejná. Další experiment byl zastaven u konce ohybové části (obr. 38), aby bylo možné porovnání výsledné síly pro ohyb s teoretickým výpočtem σ_o . Průběh síly byl opět zaznamenán na obr. 39.



Obr. 38: Vzorek - L2



Obr. 39: Vzorek - L2: Průběh zatěžující síly

Pro vytvoření výlisku L2 (obr. 38) byla naměřena síla 40740,8 N. Od této hodnoty je nutné pro objektivní porovnání sil nejprve odečíst sílu potřebnou pro kalibraci. Kalibrační síla byla stanovena na 1448 N. Pak tedy síla pro vytvoření ohybu je 39292,8 N.

Následně se provedla další úprava nástroje, při které došlo ke zmenšení rádiusu " \overline{R}_m " na hodnotu 2,5 mm. Důvodem této změny byla hypotéza, která předpokládá, že při menším rádiusu bude mít materiál nižší tendenci k zakroužení. Test však ukázal, že materiál při ohybu klade příliš velký odpor a dochází k tvorbě příčné vlny (obr. 40).



Obr. 40: Vzorek - L3

- Proměření výsledné geometrie

Pro další zpracování výsledků je vhodný pouze vzorek, u něhož tváření bylo zastaveno na konci ohybové části. Z důvodu porovnání teoretické a naměřené síly je nutné změřit konečnou tloušťku a průměr konečné příruby. Hodnoty jsou zapsány v tab. 9 a tab. 10. Měření bylo provedeno v totožném místě 3krát a následně byly stanoveny celkové střední hodnoty.

Tab. 9: Tloušťka ploché příruby

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	$t_{stř}$ [mm]
t [mm]	1,29	1,30	1,30	1,31	1,33	1,32	1,33	1,30	1,31
	1,31	1,32	1,31	1,30	1,31	1,30	1,32	1,32	
	1,31	1,29	1,29	1,32	1,32	1,31	1,30	1,30	
$t_{úhel,stř}$ [mm]	1,30	1,30	1,30	1,31	1,32	1,31	1,32	1,30	

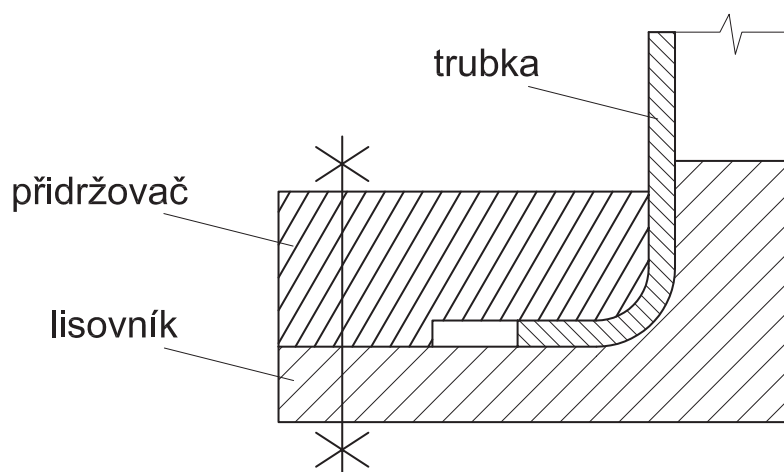
Tab. 10: Konečný průměr ploché příruby

	0°	45°	90°	135°	$\varnothing D_{stř}$ [mm]
$\varnothing D$ [mm]	47,40	47,47	47,36	47,40	47,41
	47,39	47,47	47,37	47,39	
	47,38	47,49	47,36	47,40	
$\varnothing D_{úhel,stř}$ [mm]	47,39	47,48	47,36	47,40	

- Zhodnocení

Z výsledku experimentu je zřejmé, že vyrobit plochou přírubu za stanovených podmínek toho testu není možné bez použití přidržovače.

Případné řešení experimentu s přidržovačem by mohlo být provedeno dle následujícího nákresu (obr. 41).



Obr. 41: Nákres realizace experimentu s přidržovačem

Střední hodnota konečného průměru " $D_{stř}$ " je poměrně blízká stanovenému průměru na konci rádiusu " r_m ", a proto bude možné porovnat sílu naměřenou s vypočtenou.

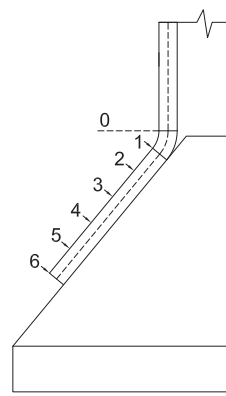
4.2.2 Experiment - výroba kuželové příruby

Průběh experimentu výroby kuželové příruby probíhá tak, že zatěžování je postupně ukončováno po jednotlivých krocích. Princip zkoušky je znázorněn na obr. 42, kde místo ukončení lemování 1 leží na konci ohybové části. Místa 2-6 jsou určena velikostí zatěžující síly. Experiment byl tedy prováděn v rozsahu od konce ohybové části až po kritický poloměr " R_{KR} " (poloha 6).

Následuje přehled vzorků, jejich popis a průběh zatěžující síly.

Vzorek - K1 je první fáze experimentu ukončená na konci ohybové části (obr. 43 a obr. 44).

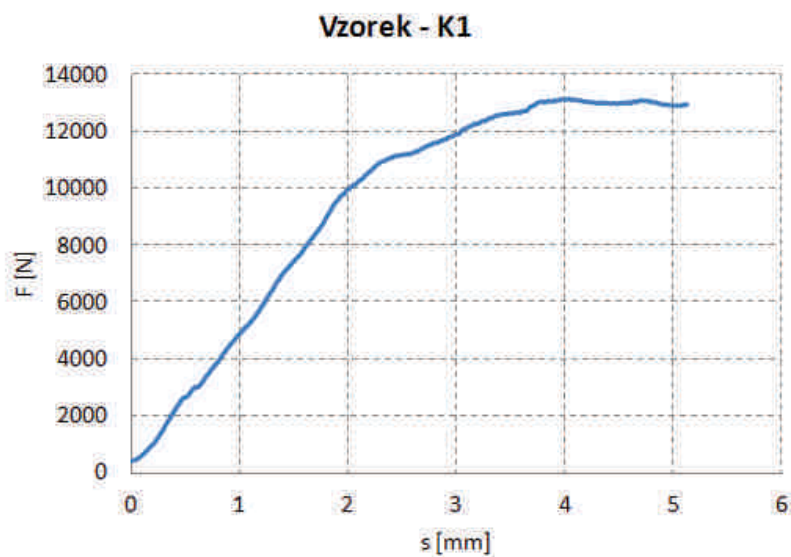
Diagram vzorku - K1 má nulový zdvih v bodě 0 dle obr. 42. Toto se týká všech následujících vzorků.



Obr. 42: Schéma zastavování experimentu



Obr. 43: Vzorek - K1



Obr. 44: Vzorek - K1: Průběh zatěžující síly

Ze záznamu průběhu zatěžování lze určit maximální sílu 13186,4 N. Dále je možné na obr. 44 pozorovat, že velikost zatěžující síly nezačíná nulovou hodnotou. To je způsobeno přítomností síly nutné pro kalibraci vzorku. Protože u všech vzorků je různá ovalita, tak i kalibrační síla bude rozdílná. Po odečtení síly nutné pro kalibraci, která byla stanovena na 414 N, je možné určit sílu potřebnou pro vytvoření ohybu. Tato síla pak je 12772,4 N.

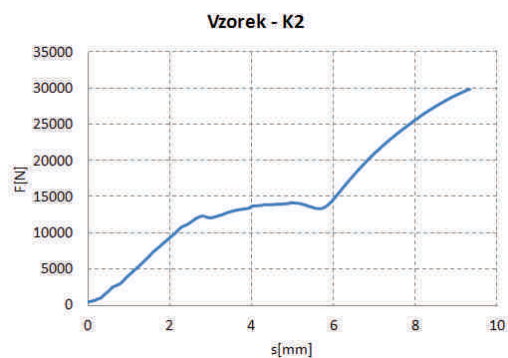
Pro vzorek - K2 a následující vzorky, kde byl experiment zastaven na předem určeném zatížení, bude stanovena kalibrační síla. Pomocí této kalibrační síly lze stanovit maximální

hodnotu síly odpovídající výsledné geometrii výlisku.

Vzorek - K2 je druhá fáze testu ukončená při dosažení síly 30 kN (obr. 45 a obr. 46).



Obr. 45: Vzorek - K2



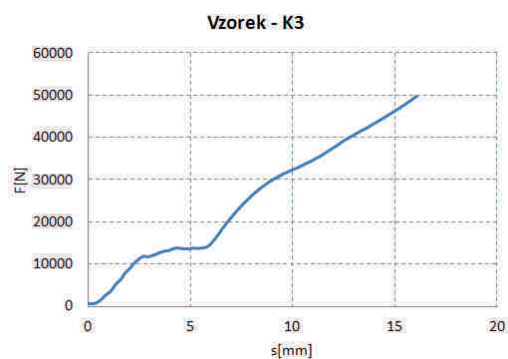
Obr. 46: Vzorek - K2: Průběh zatěžující síly

Síla potřebná na kalibraci vzorku K2 je $470,4\text{ N}$, poté je výsledná síla stanovena na $29529,6\text{ N}$.

Vzorek - K3 je třetí fáze testu ukončená při dosažení síly 50 kN (obr. 47 a obr. 48).



Obr. 47: Vzorek - K3



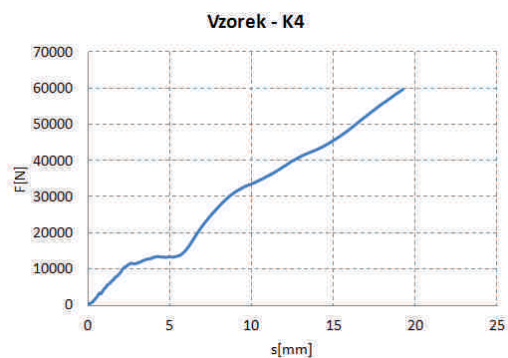
Obr. 48: Vzorek - K3: Průběh zatěžující síly

Síla potřebná na kalibraci vzorku K3 je $573,6\text{ N}$, poté je výsledná síla stanovena na $49426,4\text{ N}$.

Vzorek - K4 je čtvrtá fáze testu ukončená při dosažení síly 60 kN (obr. 49 a obr. 50).



Obr. 49: Vzorek - K4



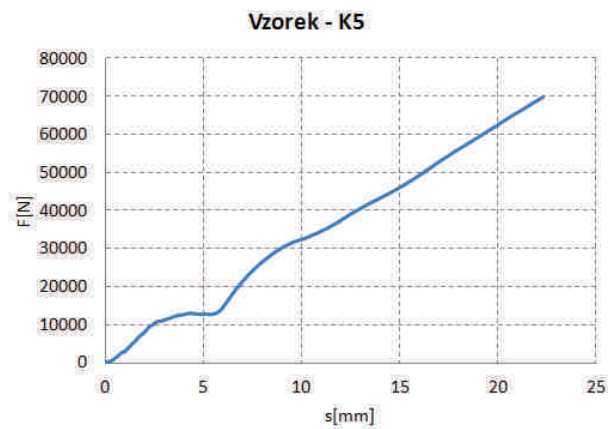
Obr. 50: Vzorek - K4: Průběh zatěžující síly

Síla potřebná na kalibraci vzorku - K4 je $300,8\text{ N}$, poté je výsledná síla stanovena na $59699,2\text{ N}$.

Vzorek - K5 je pátá fáze testu ukončená při dosažení síly 70 kN (obr. 51 a obr. 52).



Obr. 51: Vzorek - K5



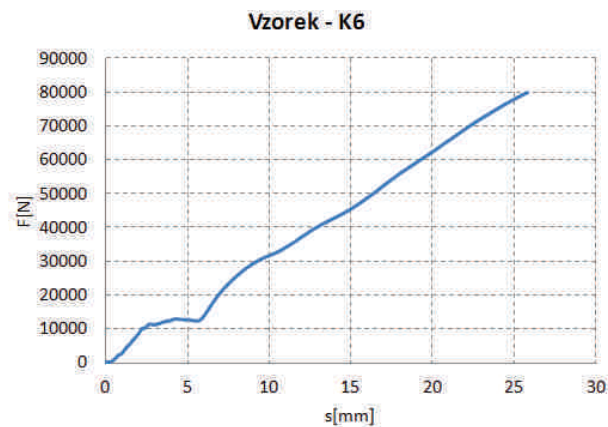
Obr. 52: Vzorek - K5: Průběh zatěžující síly

Síla potřebná na kalibraci vzorku - K5 je $300,8\text{ N}$, poté je výsledná síla stanovena na $69699,2\text{ N}$.

Vzorek - K6 je šestá fáze testu ukončená při dosažení síly 80 kN . Při šesté fázi je dosaženo kritického poloměru " R_{KR} ". Dalším zatěžováním by již nedocházelo k nárůstu velikosti příruby, ale tvořila by se příčná vlna. Na obr. 53 již je zachycen její počátek vzniku a na obr. 54 je zaznamenán průběh zatěžující síly.



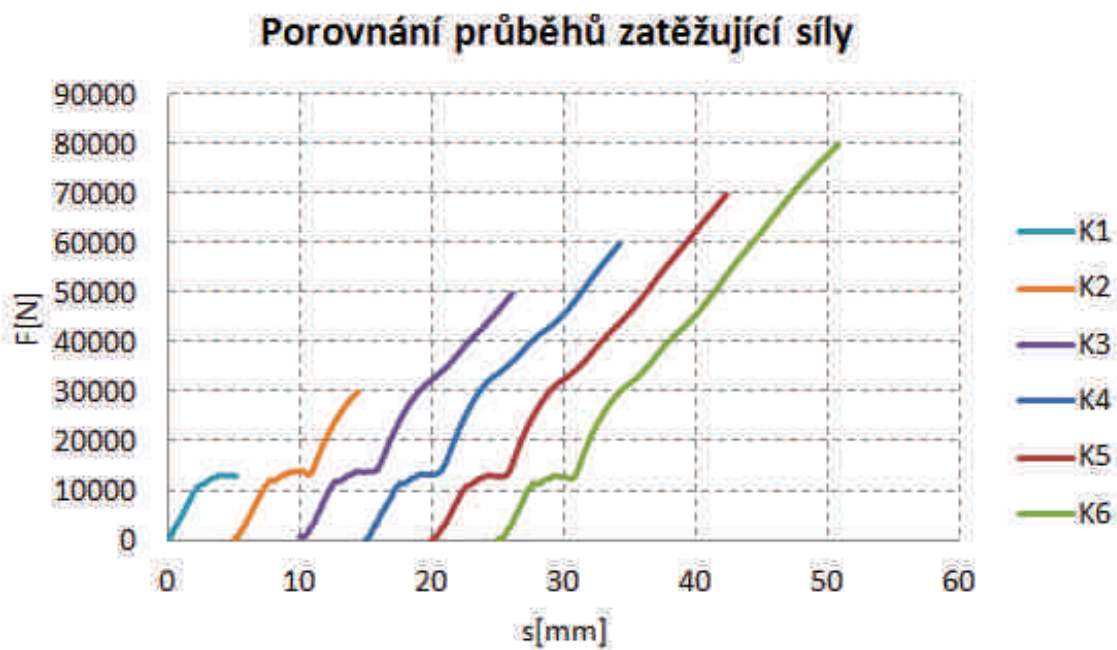
Obr. 53: Vzorek - K6



Obr. 54: Vzorek - K6: Průběh zatěžující síly

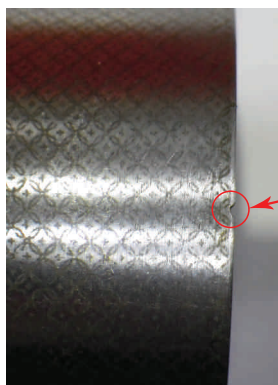
Síla potřebná na kalibraci vzorku K6 je $366,8\text{ N}$, poté je výsledná síla stanovena na $79633,2\text{ N}$.

Na obr. 55 jsou seřazeny jednotlivé průběhy zatěžujících sil ve všech fázích experimentu. Každá z křivek začíná na nulové dráze, jak naznačují diagramy na obr. 44, obr. 46, obr. 48, obr. 50, obr. 52 a obr. 54, a slouží pouze po porovnání průběhů. Protože mají křivky velmi podobný tvar, a při zanesení do jednoho grafu bez jakékoliv úpravy by se téměř celé překrývaly, jsou od sebe posunuty.



Obr. 55: Porovnání průběhů zatěžující síly

Jelikož při žádném z experimentů nevznikla trhlina, byl vytvořen umělý vrub s hloubkou cca 0,5 mm, který simuluje poškození na konci vzorku (obr. 56).



Obr. 56: Vrub

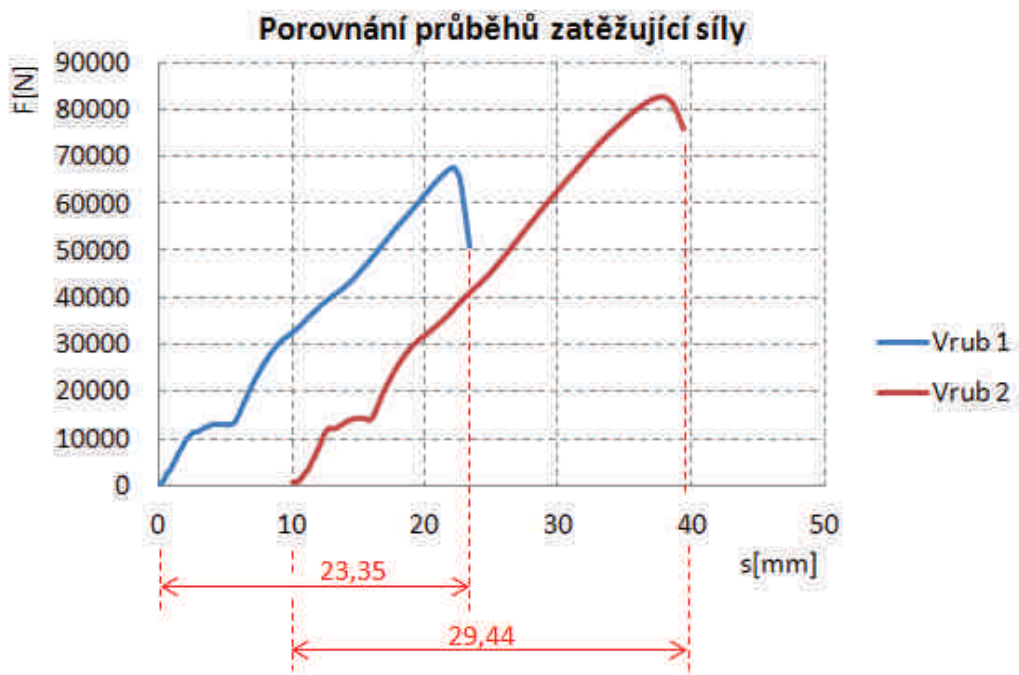


Obr. 57: Výsledný vzorek s vrubem

Experiment s tímto vzorkem proběhl dle očekávání a trhlina opravdu vznikla viz obr. 57. Dále bylo snahou zopakovat experiment s umělým vrubem, při kterém by bylo poškozené místo lépe sledováno, a jakmile by se trhlina začala tvořit, zatěžování by se ukončilo. Výsledkem však nebyl vznik trhliny, ale vytvoření příčné vlny (obr. 58). Po důkladném prohlédnutí vzorku bylo zjištěno, že v místě vrubu došlo ke ztrátě stability materiálu vytvořením tzv. krčků. Z experimentu vyplývá, že poškození hrany musí být opravdu velké, aby nejprve došlo ke vzniku trhliny. Průběhy zatěžujících sil pro vzorky s vrubem jsou znázorněny na obr. 59. Pro lepší názornost jsou křivky v grafu posunuté.



Obr. 58: Druhý vzorek s vrubem



Obr. 59: Průběhy zatěžující síly pro vzorky s vrubem

- Proměření výsledné geometrie vzorků
 U šesti vzorků, kde byla zatěžující síla postupně ukončována se změnil výsledný průměr a konečná tloušťka příruby. Měření se provádělo v jednotlivých místech 3x a poté se určily střední hodnoty. Naměřené a střední hodnoty jsou zapsány v tabulce 11 (uvedené hodnoty tloušťek jsou v mm) a v tabulce 12.

Tab. 11: Tloušťka kuželové příruby

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	$t_{stř}$
$K1$	1, 326	1, 328	1, 308	1, 304	1, 318	1, 335	1, 339	1, 345	1, 324
	1, 326	1, 329	1, 313	1, 296	1, 313	1, 332	1, 344	1, 341	
	1, 321	1, 329	1, 301	1, 294	1, 326	1, 320	1, 347	1, 337	
$t_{úhel,stř}$	1, 324	1, 329	1, 307	1, 298	1, 319	1, 329	1, 343	1, 341	
$K2$	1, 268	1, 255	1, 288	1, 237	1, 287	1, 233	1, 258	1, 261	1, 262
	1, 271	1, 253	1, 282	1, 237	1, 284	1, 238	1, 260	1, 273	
	1, 266	1, 252	1, 284	1, 240	1, 289	1, 237	1, 261	1, 271	
$t_{úhel,stř}$	1, 268	1, 253	1, 285	1, 238	1, 287	1, 236	1, 260	1, 268	
$K3$	1, 198	1, 191	1, 193	1, 202	1, 227	1, 212	1, 187	1, 211	1, 202
	1, 195	1, 198	1, 206	1, 202	1, 219	1, 211	1, 196	1, 203	
	1, 196	1, 194	1, 195	1, 199	1, 226	1, 213	1, 179	1, 202	
$t_{úhel,stř}$	1, 196	1, 194	1, 198	1, 201	1, 224	1, 212	1, 187	1, 205	
$K4$	1, 171	1, 186	1, 196	1, 195	1, 192	1, 162	1, 190	1, 178	1, 186
	1, 170	1, 195	1, 183	1, 198	1, 198	1, 175	1, 183	1, 175	
	1, 175	1, 189	1, 197	1, 201	1, 200	1, 174	1, 195	1, 174	
$t_{úhel,stř}$	1, 172	1, 190	1, 192	1, 198	1, 197	1, 170	1, 189	1, 176	
$K5$	1, 145	1, 158	1, 161	1, 158	1, 179	1, 166	1, 160	1, 167	1, 159
	1, 151	1, 151	1, 154	1, 145	1, 176	1, 169	1, 151	1, 160	
	1, 144	1, 156	1, 158	1, 155	1, 177	1, 165	1, 155	1, 166	
$t_{úhel,stř}$	1, 147	1, 155	1, 158	1, 153	1, 177	1, 167	1, 155	1, 164	
$K6$	1, 140	1, 137	1, 152	1, 140	1, 173	1, 176	1, 152	1, 136	1, 150
	1, 140	1, 136	1, 153	1, 130	1, 167	1, 166	1, 160	1, 139	
	1, 136	1, 140	1, 152	1, 136	1, 174	1, 174	1, 155	1, 131	
$t_{úhel,stř}$	1, 139	1, 138	1, 152	1, 135	1, 171	1, 172	1, 156	1, 135	

Tab. 12: Koncový průměr kuželové příruby

	0°	45°	90°	135°	$D_{stř}$ [mm]
$K1$	43, 79	43, 84	43, 82	43, 83	43, 82
	43, 79	43, 83	43, 83	43, 81	
	43, 80	43, 83	43, 84	43, 82	
$D_{úhel,stř}$ [mm]	43, 79	43, 83	43, 83	43, 82	
$K2$	47, 52	47, 51	47, 42	47, 43	47, 47
	47, 50	47, 52	47, 43	47, 43	
	47, 51	47, 51	47, 44	47, 43	
$D_{úhel,stř}$ [mm]	47, 51	47, 51	47, 43	47, 43	
$K3$	52, 49	52, 48	52, 38	52, 48	52, 46
	52, 51	52, 48	52, 38	52, 46	
	52, 50	52, 49	52, 37	52, 49	
$D_{úhel,stř}$ [mm]	52, 50	52, 48	52, 38	52, 48	

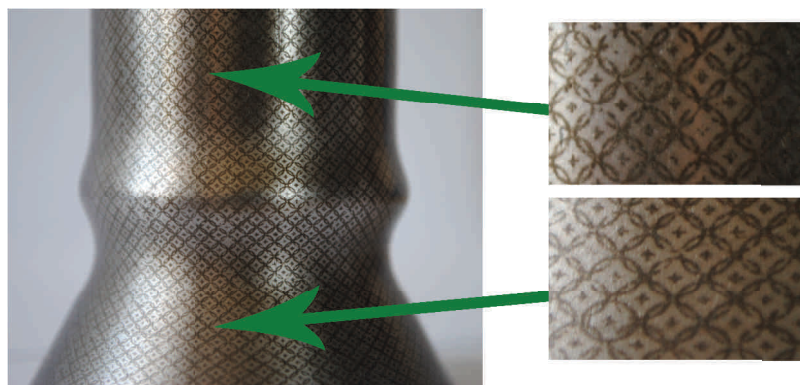
Tab. 12: Koncový průměr kuželové příruby (pokračování)

	0°	45°	90°	135°	$D_{stř}$ [mm]
K4	54,69	54,66	54,71	54,71	54,70
	54,70	54,67	54,71	54,72	
	54,69	54,68	54,70	54,71	
$D_{úhel,stř}$ [mm]	54,69	54,67	54,71	54,71	
K5	56,76	56,78	56,79	56,71	56,75
	56,75	56,77	56,79	56,69	
	56,76	56,76	56,79	56,69	
$D_{úhel,stř}$ [mm]	56,76	56,77	56,79	56,70	
K6	58,28	58,27	58,35	58,27	58,30
	58,27	58,28	58,37	58,28	
	58,29	58,28	58,39	58,28	
$D_{úhel,stř}$ [mm]	58,28	58,28	58,37	58,28	

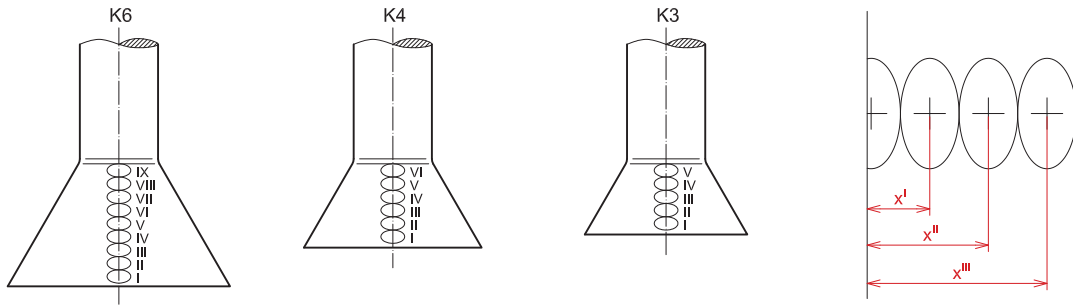
V tabulce 11 si lze všimnout, že vždy dvě střední hodnoty měřených míst u každého vzorku jsou větší než v ostatních místech. Po důkladném prohlédnutí vzorků bylo zjištěno, že mezi těmito měřenými místy je svar. V případě vzorku K2 byla měřena poloha téměř v místě svaru.

- Proměření deformační sítě

Během tváření se deformační síť nanosená na vzorek deformuje (obr. 60). Z pravidelné kružnicové sítě vzniká síť elips s rozdílnou velikostí hlavních os.

**Obr. 60:** Detail deformované sítě

K měření deformační sítě byly vybrány vzorky K3, K4, K6. U každého vzorku byl nejprve stanoven počet elips, které leží v jedné řadě od okraje příruby až do ohybu viz obr. 61. Poté byly elipsy očíslovány a určilo se, které budou změřeny. Velikost hlavních os elips byla stanovena pomocí dílenského mikroskopu. Dále byly měřeny vzdálenosti středů elips od okraje příruby, jak je znázorněno na obr. 62.



Obr. 61: Uspořádání a volba elips

Obr. 62: Určení průměru středu elips

V tabulce 13 jsou zapsány střední hodnoty naměřených rozměrů.

Tab. 13: Naměřené hodnoty elips

č. vzorku	elipsa	x [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]
K3	I	1,485	2,43	1,65
	II	3,28	2,33	1,65
	III	5,19	2,29	1,66
	IV	7,10	2,27	1,72
	V	9,06	2,13	1,69
K4	I	1,94	2,64	1,75
	II	3,81	2,64	1,73
	III	5,68	2,61	1,76
	V	9,48	2,38	1,76
	VI	11,42	2,16	1,76
K6	I	1,78	2,78	1,70
	II	3,57	2,76	1,67
	III	5,38	2,73	1,68
	V	8,97	2,44	1,67
	VII	12,64	2,27	1,70
	IX	16,42	2,14	1,72

4.3 Výpočtové vyhodnocení experimentu

Jelikož při experimentu výroby ploché příruby nebylo dosaženo žádné plochy lemu, ale byl pouze vytvořen rádius, z tohoto důvodu se tato kapitola bude zabývat jen vyhodnocením experimentu kuželové příruby.

4.3.1 Stanovení tahového napětí a poměrné deformace na hraně vzorku

Pro stanovení tahového napětí je nutné znát hodnotu poloměru středního vlákna na konci příruby " R_V " (tab. 14), která je stanovena z naměřených hodnot průměrů a tloušťek

Tab. 14: Poloměr středního vlákna na konci příruby

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
R_V [mm]	21,34	23,19	25,71	26,84	27,87	28,65

Dále lze ze získaných hodnot stanovit obvodové napětí a poměrnou deformaci na hraně výlisku. Pro výpočet obvodového napětí je použit vztah (2.16). V tomto případě se místo “ R_X “ dosadí “ R_V “ jednotlivých kroků a za “ R_V “ je dosazen kritický poloměr “ R_{KR} “, který se rovná konečnému poloměru vzorků - K6.

Nejprve je nutné určit hodnotu extrapolované meze kluzu.

$$\sigma_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{1-0,417}{1+0,417} \cdot 1852,6 \cdot 0,417^{0,417} = 529,27 \text{ MPa}$$

Poté je výpočet obvodového napětí vzorku - K1 následující:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= \sigma_{ke} \cdot \left\{ 1 - \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{R_V}{R_{KR}} \right)^{\mu \cdot \operatorname{cotg} \alpha} \right] \right\} = \\ &= 529,27 \cdot \left\{ 1 - \left(1 + \frac{\operatorname{tg} 30}{0,05} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{21,34}{28,65} \right)^{0,05 \cdot \operatorname{cotg} 30} \right] \right\} = 362,00 \text{ MPa}. \end{aligned}$$

Poměrná deformace je stanovena následovně:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{2\pi R_V - 2\pi r_s}{2\pi r_s} = \frac{2\pi 21,34 - 2\pi 19,29}{2\pi 19,29} = 0,106$$

Předešlý postup výpočtu byl proveden u každého vzorku. Získané výsledky jsou zapsány v tabulce 15.

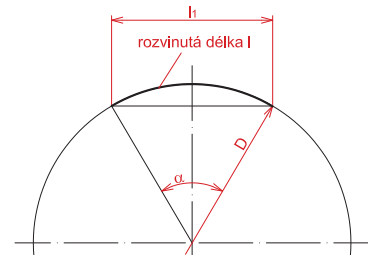
Tab. 15: Výsledné tahové napětí a poměrná deformace

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
σ_{θ} [MPa]	362,00	408,78	467,29	491,84	513,41	529,27
ε [-]	0,106	0,202	0,333	0,391	0,445	0,485

4.3.2 Kontrola korekce

Aby bylo možné vyhodnotit naměřené rozměry deformační sítě, je vhodné určit nutnost použití korekce.

Jelikož délka osy elipsy “ l_1 “ je zkrácená z důvodu zaoblení válcové plochy, je třeba určit skutečný rozměr této délky. Výpočet se provedl podle následujícího vztahu odvozeného ze schématu znázorněném na obr. 63.

**Obr. 63:** Schéma pro určení rozvinuté délky

$$l_{K3}^I = \frac{2\pi D_{K3}^I \arcsin\left(\frac{l_1}{D_{K3}^I}\right)}{360} \quad (4.13)$$

Z výše uvedeného vzorce je patrné, že se nejprve musí určit průměr přímky v místě středu elipsy. Průměr je určen pomocí vzdálenosti “ x ” a konečného průměru příruby “ $D_{stř}$ ” viz tab. 12.

$$D_{K3}^I = 2\left(\frac{D_{stř}}{2} - x\frac{\sqrt{3}}{3}\right) = 2\left(\frac{52,46}{2} - 1,485\frac{\sqrt{3}}{3}\right) = 50,75 \text{ mm}, \quad (4.14)$$

Stejný výpočet je proveden u každé z elips a výsledek je zapsán do tabulky 16.

Tab. 16: Vypočítané průměry příruby v místě středů elips

$K3$	I	II	III	IV	V	
$D_{K3} [mm]$	50,75	48,68	46,47	44,26	42,00	
$K4$	I	II	III	V	VI	
$D_{K4} [mm]$	52,47	50,30	48,15	43,75	41,52	
$K6$	I	II	III	IV	V	IX
$D_{K6} [mm]$	56,25	54,18	52,09	47,94	43,71	39,35

Nyní lze určit rozvinutou délku.

$$l_{K3}^I = \frac{2\pi D_{K3}^I \arcsin\left(\frac{l_1}{D_{K3}^I}\right)}{360} = \frac{2\pi 50,75 \arcsin\left(\frac{2,43}{50,75}\right)}{360} = 2,431 \text{ mm}$$

Výsledná rozvinutá délka a procentuální navýšení s naměřenou hodnotou je zapsáno v tabulce 17.

Tab. 17: Procentuální navýšení délky l_1

č. vzorku	elipsa	$l_1 [mm]$	$l_{K3} [mm]$	procentuální navýšení [%]
$K3$	I	2,43	2,431	100,041
	II	2,33	2,331	100,043
	III	2,285	2,286	100,044
	IV	2,27	2,271	100,044
	V	2,13	2,2,131	100,047

Z procentuálního navýšení vyplývá, že rozdíl mezi délkami je menší než 0,05 %. Je tedy možné zanedbat zaoblení příruby a pro další vyhodnocování užít naměřenou délku “ l_1 ”.

4.3.3 Reálné hodnoty lokálních deformací

S použitím naměřených rozměrů zdeformovaného elementu sítě a s pomocí rovnic (2.25), (2.26) se určí poměrné deformace “ ε_1 “ a “ ε_2 “, které se následně vztahem (2.27) převedou na logaritmické deformace “ φ_1 “ a “ φ_2 “. Ze vztahu (2.28) se dopočítá “ φ_3 “. Pro další práci s naměřenými daty bude vypočtena i hodnota efektivní deformace “ φ_{ef} “.

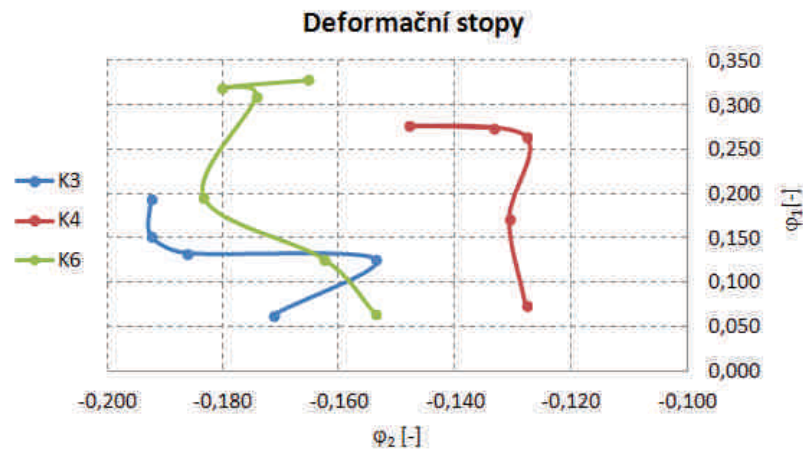
$$\begin{aligned}
 \varepsilon_1 &= \frac{l_1 - d_0}{d_0} = \frac{2,43 - 2}{2} = 0,215 \\
 \varepsilon_2 &= \frac{l_2 - d_0}{d_0} = \frac{1,65 - 2}{2} = -0,175 \\
 \varphi_1 &= \ln(1 + \varepsilon_1) = \ln(1 + 0,215) = 0,195 \\
 \varphi_2 &= \ln(1 + \varepsilon_2) = \ln(1 - 0,175) = -0,192 \\
 \varphi_3 &= -\varphi_1 - \varphi_2 = -0,195 + 0,192 = -0,003 \\
 \varphi_{ef} &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2} = \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(0,195 + 0,192)^2 + (-0,192 + 0,003)^2 + (-0,003 - 0,195)^2} = \\
 &= 0,224
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Stejný postup je proveden u každé z elips a výsledky se zapíše do tabulky 18.

Tab. 18: Vypočtené hodnoty deformací

č. vzorku	elipsa	ε_1 [—]	ε_2 [—]	φ_1 [—]	φ_2 [—]	φ_3 [—]	φ_{ef} [—]
K3	I	0,215	-0,175	0,195	0,192	-0,003	0,224
	II	0,165	-0,175	0,153	0,192	0,039	0,203
	III	0,143	-0,17	0,133	0,186	0,053	0,192
	IV	0,135	-0,143	0,127	0,154	0,027	0,164
	VI	0,065	-0,158	0,063	0,171	0,108	0,173
K4	I	0,318	-0,125	0,276	-0,134	-0,142	0,276
	II	0,32	-0,138	0,278	-0,148	-0,130	0,278
	III	0,305	-0,12	0,266	-0,128	-0,138	0,266
	V	0,188	-0,123	0,172	-0,131	-0,041	0,179
	VI	0,078	-0,12	0,075	-0,128	0,053	-0,42
K6	I	0,39	-0,153	0,329	-0,165	-0,164	0,329
	II	0,378	-0,165	0,320	-0,180	-0,140	0,321
	III	0,365	-0,16	0,311	-0,174	-0,137	0,312
	V	0,218	-0,168	0,197	-0,183	-0,014	0,220
	VII	0,135	-0,15	0,127	-0,163	0,036	0,171
	IX	0,068	-0,143	0,065	-0,154	0,089	0,154

Z vypočtených hodnot je možné stanovit skutečné deformační stopy viz obr. 64.



Obr. 64: Výsledné deformační stopy

4.3.4 Stanovení tloušťek pomocí deformační sítě

Při znalosti “ φ_3 “ lze stanovit tloušťku v místech elips pomocí vztahu:

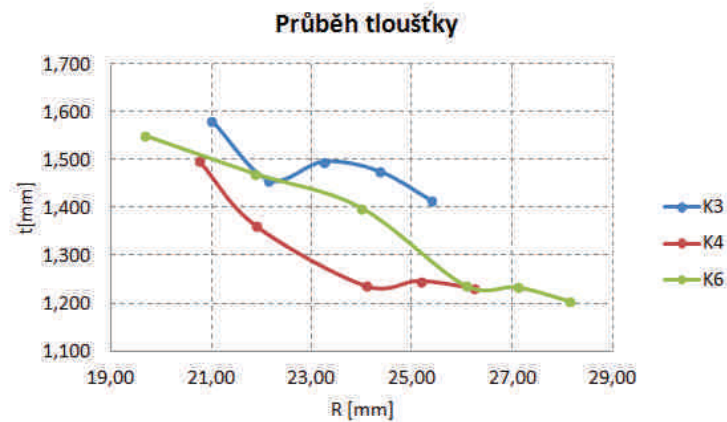
$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \implies t = t_0 \cdot e^{\varphi_3} = 1,42 \cdot e^{-0,003} = 1,416 \text{ mm} \quad (4.16)$$

Tento vzorec bude aplikován i na všechny měřené elipsy. Výsledné tloušťky jsou poté zapsány v tabulce 19.

Tab. 19: Hodnoty tloušťky určené pomocí deformační sítě

<i>K3</i>	I	II	III	IV	V	
<i>t [mm]</i>	1,417	1,477	1,497	1,459	1,583	
<i>K4</i>	I	II	III	V	VI	
<i>t [mm]</i>	1,232	1,247	1,237	1,363	1,498	
<i>K6</i>	I	II	III	IV	V	IX
<i>t [mm]</i>	1,205	1,235	1,238	1,401	1,472	1,551

Průběhy tloušťek pro jednotlivé vzorky jsou znázorněné na obr. 65.



Obr. 65: Průběh tloušťky vypočítaný k deformační sítě

4.3.5 Stanovení napětového stavu

K určení hlavních napětí “ σ_1 “ a “ σ_2 “ je použit vztah pro jejich poměr a vztahy pro výpočet efektivního napětí “ σ_{ef} “. Následně se provede vzorový výpočet.

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\overbrace{2 \cdot \varphi_2 + \varphi_1}^B}{2 \cdot \varphi_1 + \varphi_2} \implies \sigma_2 = B \cdot \sigma_1 \quad (4.17)$$

Pro snadnější orientaci ve výpočtu je zlomek $\frac{2 \cdot \varphi_2 + \varphi_1}{2 \cdot \varphi_1 + \varphi_2}$ nahrazen konstantou “ B “.

$$\sigma_{ef} = K \cdot \varphi_{ef}^n \quad (4.18)$$

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (4.19)$$

$$K \cdot \varphi_{ef}^n = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot B \cdot \sigma_1 + (B \cdot \sigma_1)^2}$$

$$K \cdot \varphi_{ef}^n = \sqrt{\sigma_1^2 (1 - B + B^2)}$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{K \cdot \varphi_{ef}^n}{\sqrt{1 - B + B^2}} = \frac{K \cdot \varphi_{ef}^n}{\sqrt{1 - \frac{2 \cdot \varphi_2 + \varphi_1}{2 \cdot \varphi_1 + \varphi_2} + \left(\frac{2 \cdot \varphi_2 + \varphi_1}{2 \cdot \varphi_1 + \varphi_2}\right)^2}} = \\ &= \frac{1852,60 \cdot 991,84^{0,42}}{\sqrt{1 - \frac{2 \cdot (-0,192) + 0,195}{2 \cdot 0,195 - 0,192} + \left(\frac{2 \cdot (-0,192) + 0,195}{2 \cdot 0,195 - 0,192}\right)^2}} = 583,13 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_2 = \frac{2 \cdot \varphi_2 + \varphi_1}{2 \cdot \varphi_1 + \varphi_2} \cdot \sigma_1 = \frac{2 \cdot (-0,192) + 0,195}{2 \cdot 0,195 - 0,192} \cdot 583,13 = -562,08 \text{ MPa}$$

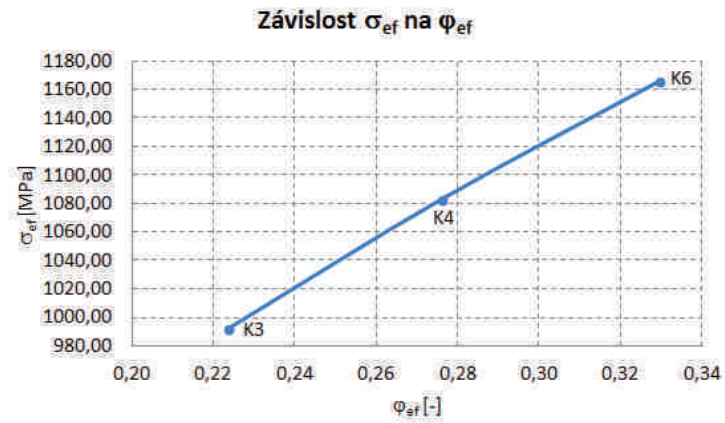
$$\sigma_{ef} = K \cdot \varphi_{ef}^n = 1852,60 \cdot 991,84^{0,42} = 991,84 \text{ MPa}$$

Výpočet je dále použit i na ostatní body měření. Výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulce 20.

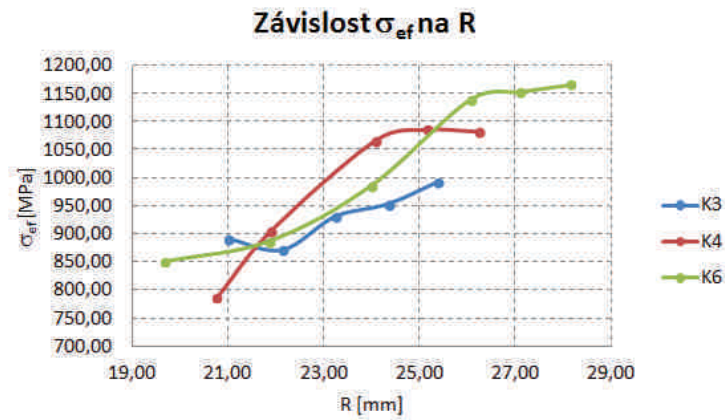
Tab. 20: Vypočtené hodnoty napětí

č. vzorku	elipsa	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_{ef} [MPa]
K3	I	583,13	-562,08	991,84
	II	353,66	-725,72	953,10
	III	258,95	-774,01	930,90
	IV	352,54	-640,52	871,98
	VI	155,85	959,82	892,16
	K4	I	1093,84	22,70
II		1061,52	-47,45	1086,02
III		1080,74	28,15	1066,95
V		716,25	-300,95	905,06
VI		87,67	-739,72	787,22
K6		I	1163,87	-3,84
	II	1102,22	-96,70	1153,61
	III	1091,21	-91,48	1139,70
	V	628,05	-507,28	985,08
	VII	314,08	-686,70	886,51
	IX	84,80	889,07	849,85

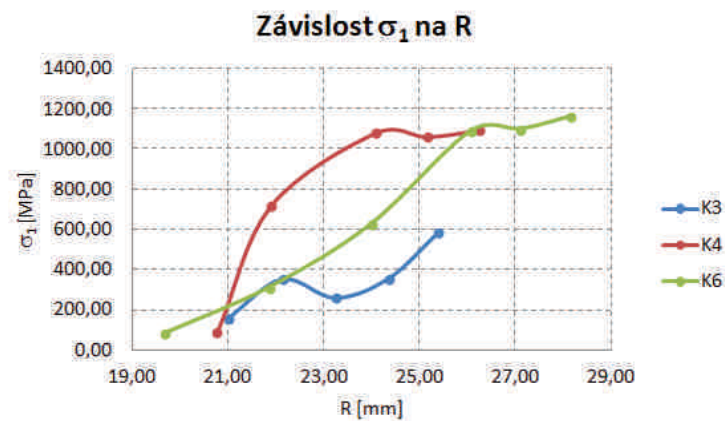
Z vypočtených hodnot lze stanovit následující závislosti obr. 66, obr. 67, obr. 68.



Obr. 66: Závislost σ_{ef} na φ_{ef}



Obr. 67: Závislost σ_{ef} na R



Obr. 68: Závislost σ_1 na R

5 KONFRONTACE TEORIE S EXPERIMENTEM

V této kapitole je provedeno porovnání hodnot získaných pomocí experimentu s teoretickými předpoklady. Porovnání se týká zatěžujících sil a průběhu tloušťek rozšířených konců.

5.1 Stanovení teoretické zatěžující síly

- Výpočet zatěžující síly pro plochou přírubu

V případě ploché příruby není třeba určovat celkovou zatěžující sílu pouze nutnou pro vytvoření rádiusu. V závislosti na uskutečněném měření před samotným experimentem, kde byla naměřena skutečná tloušťka stěny vzorku, je třeba přizpůsobit ostatní rozměry. Parametry nutné pro výpočet jsou pro přehlednost zapsány níže.

$$\begin{aligned}\sigma_k &= 223 \text{ MPa} && \text{napětí na mezi kluzu} \\ r_s &= 19,29 \text{ mm} && \text{střední průměr vzorku} \\ r_m &= 2,58 \text{ mm} && \text{vnitřní rádius vytvořené příruby} \\ t_0 &= 1,42 \text{ mm} && \text{počáteční tloušťka trubky} \\ \mu &= 0,05 && \text{koeficient tření} \\ \alpha &= 90^\circ = \frac{\pi}{2} && \text{úhel sklonu příruby}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_O &= 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot t_0 \cdot \frac{\sigma_k \cdot t_0}{2 \cdot r_m} \cdot e^{\mu\alpha} = 2 \cdot \pi \cdot 19,29 \cdot 1,42 \cdot \frac{223 \cdot 1,42}{2 \cdot 2,58} \cdot e^{0,05 \cdot \frac{\pi}{2}} = \\ &= \underline{\underline{11424,92 \text{ N}}}\end{aligned}$$

- Výpočet zatěžující síly pro kuželovou přírubu

Celková síla pro vytvoření kuželové příruby lze určit z rovnice (2.24), která již zahrnuje vliv zpevnění materiálu. Nejprve je však nutné určit modul zpevnění “ D ” ze vztahu (2.22). Vstupní hodnoty potřebné k výpočtu jsou pak:

$$\begin{aligned}\sigma_k &= 223 \text{ MPa} && \text{napětí na mezi kluzu} \\ \sigma_{ke} &= 529,27 \text{ MPa} && \text{extrapolovaná mez kluzu} \\ r_s &= 19,29 \text{ mm} && \text{střední průměr vzorku} \\ r &= 19,82 \text{ mm} && \text{poloměr středního vlákna vzorku na konci rádiusu} \\ R_{KR} &= 28,65 \text{ mm} && \text{kritický poloměr příruby} \\ r_m &= 3,58 \text{ mm} && \text{vnitřní rádius vytvořené příruby} \\ t_0 &= 1,42 \text{ mm} && \text{počáteční tloušťka trubky} \\ \mu &= 0,05 && \text{koeficient tření} \\ \alpha &= 30^\circ && \text{úhel sklonu příruby} \\ K &= 1852,6 \text{ mm} && \text{materiálová konstanta} \\ n &= 0,417 \text{ mm} && \text{exponent zpevnění}\end{aligned}$$

$$D = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{2}{1+0,417} \cdot 1852,6 \cdot 0,417^{0,417} = 1815,68 \text{ MPa}$$

$$F = \left\{ \left[\sigma_{ke} + \frac{D}{2} \left(\frac{R_{KR} - r}{r} \right) \right] \left(1 + \frac{\text{tg } \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R_{KR}} \right)^{\mu \cdot \text{cotg } \alpha} \right] + \frac{\sigma_k \cdot t_0}{2 \cdot r_m + t_0} \right\} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot t_0$$

$$F = \left\{ \left[529,27 + \frac{1852,6}{2} \left(\frac{28,65 - 19,82}{19,82} \right) \right] \left(1 + \frac{\text{tg}(30)}{0,05} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{19,82}{28,65} \right)^{0,05 \cdot \text{cotg}(30)} \right] + \frac{223 \cdot 1,42}{2 \cdot 3,58 + 1,42} \right\} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 19,29 \cdot 1,42 =$$

$$= \underline{\underline{70233,99 \text{ N}}}$$

Stejně jako v předchozí kapitole i zde je stanovena síla nutná pro vytvoření rádiusu.

$$F_O = \frac{\sigma_k \cdot t_0}{2 \cdot r_m + t_0} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot t_0 = \frac{223 \cdot 1,42}{2 \cdot 3,5 + 1,42} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 19,25 \cdot 1,42 =$$

$$= \underline{\underline{6351,94 \text{ N}}}$$

5.2 Vyhodnocení zatěžujících sil

Pro názornost jsou v tabulce 21 přehledně zapsány teoretické hodnoty sil a výsledky získané experimentem. Zároveň jsou uvedeny procentuální rozdíly výsledných sil.

Tab. 21: Porovnání výsledných sil

Plochá	Ohyb	Teorie	11 424,92 N	243,92 %
		Experiment	39 292,8 N	
Kůželová	Celková	Teorie	70 233,99 N	13,38 %
		Experiment	79 633,2 N	
	Ohyb	Teorie	6 351,94 N	101,07 %
		Experiment	12 722,4 N	

Experimenty ukázaly, že teoretické výpočty vedou k nižším hodnotám. U ploché příruby, kde se prokazatelně vytvořil jen poloměr, rozdíl činil téměř 250 %. Jak bylo zmíněno v teoretické části, i v oblasti ohybu dochází k rozšiřování z poloměru “ r_s ” na poloměr “ r ”, z tohoto důvodu bude provedena modifikace výpočtu ohybové síly pro plochou přírubu. Modifikace spočítá v úpravě vzorce 2.12.

$$F_O = 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot t_0 \cdot \left[1, 1 \cdot \sigma_k \cdot \ln \frac{r}{r_s} + \frac{\sigma_k \cdot t_0}{2 \cdot r_m} \right] \cdot e^{\mu \alpha} =$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot 19,29 \cdot 1,42 \cdot \left[1, 1 \cdot 223 \cdot \ln \frac{22,58}{19,29} + \frac{223 \cdot 1,42}{2 \cdot 2,58} \right] \cdot e^{0,05 \frac{\pi}{2}} = 18616,54 \text{ N}$$

Výpočtem bylo provedeno zpřesnění, avšak výsledná hodnota je i nadále menší, než hodnota získaná experimentem, a to o 111,06 %.

Tuto skutečnost je třeba potvrdit dalšími experimenty, např. různým mazáním a poloměrem ohybu. V teoretickém výpočtu je nutno zohlednit, že kruhovitá součást má tvar “torodiálního dílce“. V literatuře [18] je uveden vztah bez udání autora. Pro další výzkum je přínosné se blíže zabývat tímto vztahem.

5.3 Stanovení teoretického průběhu tloušťky

Experiment ploché příruby nebylo možné provést, protože po vytvarování poloměru došlo k okamžitému zakroužení. Proto bude dále pozornost věnována pouze kuželové přírubě.

Průběh změny tloušťky materiálu lze vypočítat dle vztahu (2.1), kde se “ σ_θ “ určí pomocí vzorce (2.16) a “ σ_r “ dle (2.17). Za počáteční tloušťku “ t_r “ je dosazena výsledná střední hodnota z naměřeného výsledku vzorku - K1 viz tab. 11. Za hodnotu R_V dosadíme kritický poloměr vzorku K6 z tab. 14. Tato tabulka je vytvořena za pomoci přírůstku na poloměru “ λ “, který je roven $0,25 \text{ mm}^1$.

$\sigma_{ke} =$	$529,27 \text{ MPa}$	extrapolovaná mez kluzu
$r =$	$19,82 \text{ mm}$	poloměr středního vlákna vzorku na konci rádiusu
$R_V = R_{KR} =$	$28,65 \text{ mm}$	naměřený kritický poloměr příruby
$t_r =$	$1,32 \text{ mm}$	tloušťka na konci rádiusu
$\mu =$	$0,05$	koeficient tření
$\alpha =$	30°	úhel sklonu příruby
$\lambda =$	$0,25 \text{ mm}$	přírůstek na poloměru

Při poloměru $R_x = r$ je tloušťka rovna hodnotě t_r .

$$\begin{aligned}
 R_x &= r + \lambda = 19,82 + 0,25 = 20,07 \text{ mm}, \\
 \sigma_r &= -\sigma_{ke} \cdot \left(1 + \frac{\text{tg } \alpha}{\mu}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{R_x}{R_V}\right)^{\mu \cdot \text{cotg } \alpha}\right] = \\
 &= -529,27 \cdot \left(1 + \frac{\text{tg } 30}{0,05}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{20,07}{28,65}\right)^{0,05 \cdot \text{cotg } 30}\right] = -234,29 \text{ MPa}, \\
 \sigma_\theta &= \sigma_{ke} \cdot \left\{1 - \left(1 + \frac{\text{tg } \alpha}{\mu}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{R_x}{R_V}\right)^{\mu \cdot \text{cotg } \alpha}\right]\right\} = \\
 &= 529,27 \cdot \left\{1 - \left(1 + \frac{\text{tg } 30}{0,05}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{20,07}{28,65}\right)^{0,05 \cdot \text{cotg } 30}\right]\right\} = 294,98 \text{ MPa}, \\
 t_x &= t_r \left(\frac{r}{R_x}\right)^{\frac{1+(\sigma_r/\sigma_\theta)}{2-(\sigma_r/\sigma_\theta)}} = 1,32 \left(\frac{19,82}{20,07}\right)^{\frac{1+(-234,29/294,98)}{2-(-234,29/294,98)}} = 1,320 \text{ mm}.
 \end{aligned}$$

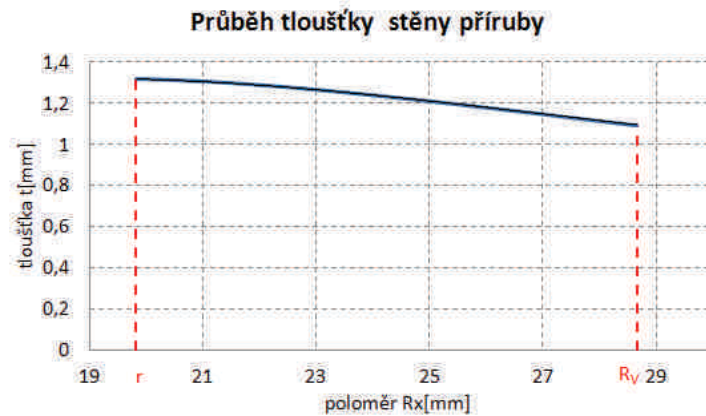
¹V tabulce 22 je použito $\lambda = 1 \text{ mm}$ z důvodu velkého množství hodnot.

Výpočet je dále prováděn stejným algoritmem, jen poslední hodnota R_x je rovna R_M .

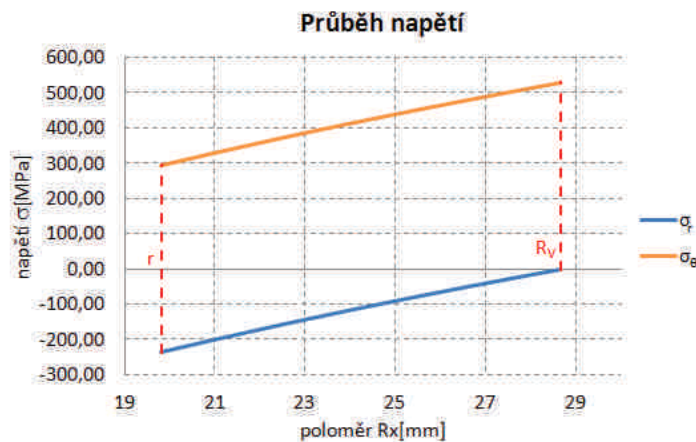
Tab. 22: Koncový průměr kuželové příruby

R_x [mm]	σ_r [MPa]	σ_θ [MPa]	t_x [mm]
19,82	-234,29	294,98	1,320
20,82	-204,27	325,00	1,311
21,82	-175,31	353,96	1,295
22,82	-147,31	381,96	1,273
23,82	-120,20	409,07	1,247
24,82	-93,92	435,35	1,219
25,82	-68,42	460,85	1,189
26,82	-43,64	485,63	1,157
27,82	-19,53	509,74	1,125
28,65	0,00	529,27	1,098

Z výsledných dat, zapsaných v tabulce 22, byla sestavena závislost tloušťky na poloměru příruby (obr. 69) a průběhy napětí viz obr. 70.



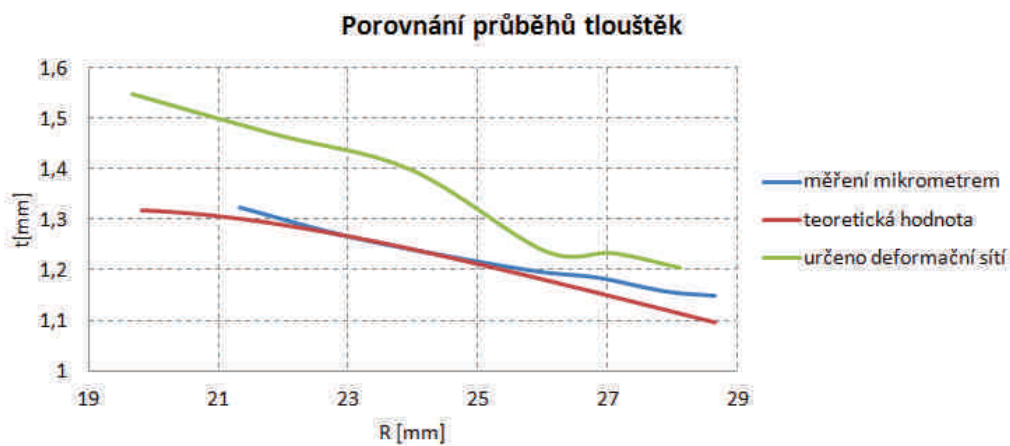
Obr. 69: Průběh tloušťky pro kuželovou přírubu



Obr. 70: Průběh napětí pro kuželovou přírubu

5.4 Vyhodnocení průběhů tloušťek

Pro porovnání výsledných průběhů, určenými odlišnými metodami, byly zaneseny jednotlivé výsledky do společného grafu (obr. 71).



Obr. 71: Porovnání průběhů tloušťek

Průběhy tloušťek měřené mikrometrem spolu s teoretickými hodnotami jsou téměř stejné, na rozdíl od průběhu tloušťky určené pomocí deformační sítě. Proto by bylo vhodné pro zpřesnění výsledků provést experiment s více vzorky se stejnou zatěžovací silou. Další možností pro dosažení přesnějších výsledků je měření deformační sítě ve více místech příruby, zvolení přesnějšího měřicího přístroje nebo použití jiného tvaru deformační sítě.

6 ZÁVĚRY

Diplomová práce se zabývá rozšiřováním konců trubek do ploché příruby a kuželového hrdla. Práce je rozdělena na dvě části. Nejprve jsou uvedeny teoretické poznatky a následně je popsáno jejich využití při realizaci experimentu.

První kapitola rozebírá současný stav výroby zakončení trubek. Bylo zde zmíněno, že existuje široká škála typů zakončení přičemž pro účely této práce byly využity pouze typy výše zmíněné.

Ve druhé kapitole je navázáno teoretickým popisem procesu rozšiřování trubek. Dále zde byly zavedeny možné druhy defektů vzniklé při tváření.

Před samotným experimentem bylo nutné vymezit použité technologie, definovat materiál, geometrii vzorku, navrhnout nástroj a provést naplánování kroků experimentu, což je obsahem třetí kapitoly. Další podkapitoly již shrnují konkrétní výsledky.

Přestože trubky byly svařované, tak byl svar dobře upraven. Úchyly kruhovitosti činily u průměru 40 *mm* maximálně 0,29 *mm*.

Koncepce navrženého nástroje se ukázala jako velmi účelná, neboť kalibrační část byla vhodně zvolena. Vzorek bylo možné snadno sejmout z nástroje. Jelikož měl dostatek maziva na vnitřní ploše, tak to dokazuje, že mazivo bylo vhodně zvoleno.

Dále bylo zjištěno, že plochou přírubu za stanovených podmínek tohoto testu není možné vyrobit bez přidržovače. Experiment byl využit pouze k porovnání síly potřebné pro ohyb.

Kuželová příruba přinesla velmi cenné poznatky, protože při její výrobě bylo dosaženo mnohem většího průměru, to znamená zvětšení ohniska deformace, což umožnilo podrobné měření.

Ukázalo se, že křivky znázorněné na obr. 55 vykazují téměř identický průběh sil. Defekt ve formě trhliny nebylo možné získat, nicméně při velkém rozměru příruby došlo ke ztrátě vzpěrné stability trubky, čímž vznikla příčná vlna.

Porovnání teoretických a experimentálních hodnot sil uvedené v tabulce 21 naznačuje, že teoretické výpočty značně ovlivňuje hodnota ohybového napětí. Toto je vhodná oblast k odhalení příčiny.

Pokud jde o průběhy tloušťek, tak teoretické hodnoty a hodnoty měřené miktrometrem se téměř shodují. Teoretické hodnoty byly stanoveny z rovnice (2.1) a jsou přijatelné. Průběh tloušťky určené pomocí deformační sítě se od předchozích dvou lišil.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [3]

1. AVERKIJEV, Ju. A. a A. Ju. AVERKIJEV. *Technologija cholođnoj šampovki*. Moskva: Mašinostrojenije, 1989. 320 s. ISBN 5-217-00336-7.
2. BOGOJAVLENSKOJ, K.N., P.V. KAMNEV. *Izgotovlenije detalej plastičeskim deformirovanijem*. 1.vyd. Leningrad: Mašinostrojenije. 1975. 424s. UDK 621.777.4.
3. *Citace* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.citace.com/>
4. CNC a NC ohýbání trubek a profilů. *Ronelt* [online]. 2014 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.ronelt.cz/czech/?menu=ohybani-trubek>
5. ČERMÁK, Jan. *Zásoba plasticity - nanášení sítě* [online]. 2008 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMTV/7_zas_plast.pdf
6. ČSN 41 7240. *Ocel 17 240*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1972.
7. DVOŘÁK, Milan. *Technologie tváření: plošné a objemové tvaření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2007, 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
8. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
9. GORBUNOV, M. N. *Technologija zagotovitelno-šampovočnych rabot v proizvodstve samoletov*. 1.ed. Moskva: Mašinostrojenie, 1981. 221 s. UDK 629.7:621.73.01/07.002(07).
10. HUANG, Yuung Ming. Flaring and nosing process for composite annoy tube in circular cone tool application. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2009, **43**(11-12): 1167-1176 [cit. 2015-04-10]. DOI: 10.1007/s00170-008-1795-8. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-008-1795-8>
11. CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ INFORMACE O POUŽITÍ, ZPRACOVÁNÍ, SVAŘOVÁNÍ A MOŽNÉ KOROZI. *ITALINOX* [online]. 2013 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/?p1=plechy&p2=p6&p3=p2>
12. LU, Yuung-Hwa. Study of tube flaring ratio and strain rate in the tube flaring process. *Finite Elements in Analysis and Design* [online]. 2004, **40**(3): 305-318 [cit. 2015-04-10]. DOI: 10.1016/S0168-874X(03)00049-0. ISSN 0168874x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168874X03000490>
13. MARCINIAK, Zdzislaw, John L. DUNCAN and Jack S. HU. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 07506530000.
14. NÉMETH, Stanislav, Anna ŠŮŇOVÁ a Emil EVIN. Forming limit diagrams as an important indicator of progressive high-strenght steel sheets forming. *Transfer inovácií* [online]. 2013, (26): 17-20 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/26-2013/pdf/017-020.pdf>

15. PODANÝ, K. Problematika mezní tvařitelnosti dílců z trubek. *Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně , Edice PhD Thesis*, 2008, roč. 2008, č. 472, s. 32 (s.)ISSN: 1213- 4198.
16. POPOV, E. A. *Osnovy teorii listovoj šampovki*. Moskva: Mašinostrojenije, 1968. 283 s. UDK 621.983.3.001.1(075.8).
17. *Přípravek a metodika pro nanášení deformační sítě na trubky* [online]. 2013 [cit. 2015–04–23]. Dostupné z:http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace_soubory/pripravek_a_metodika_pro_nanaseni_deformacni_site_na_trubky.pdf
18. REISSNER, J. a W. SCHMID. Tiefziehen. In: LANGE, K. *Umformtechnik: Band 3: Blechbearbeitung*. Berlin: Springer–Verlag, 1990, s. 311-384. ISBN 3-540-50039-1.
19. SAMEK, Radko a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření: Část I*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010, 134 s. ISBN 978-80-214-4220-7.
20. SAMEK, Radko, Zdeněk LIDMILA a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření: Část II*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 155 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-4406-5.
21. STOROŽEV, M. V. a E. A. POPOV. *Teorija obrabotki metallov davljenijem*. 3. vyd. Moskva: Mašinostrojenije, 1971. 424 s. UDK 621.77.001.1(075.8).
22. STOROŽEV, M. V. a J. A. POPOV. *Teorija tvarnjenja kovov*. 1. vyd. Bratislava: SNTL Praha, 1978. 488 s.
23. SUN, Z.C. a H. YANG. Study on forming limit and feasibility of tube axial compressive process. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2007, (187-188): 292-295 [cit. 2015-03-28]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.102. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013606010259>
24. Tenkostěnné, silnostěnné profily, ocelové trubky Karviná, Ostrava. *Evropská databanka* [online]. 2014 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://nabidky.edb.cz/Nabidka-14724-Tenkostenne-silnostenne-profilu-ocelove-trubky-Karvina-Ostrava>
25. Tube forming. *Harco metal products, inc.* [online]. 2014 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.tubebending.net/tubeforming.html>
26. *TWT GLOBAL ENTERPRISE LTD.* [online]. 2013 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.tbtmachinery.com/index.php/en>
27. YEH, Fung-Huei. Study of tube flaring forming limit in the tube flaring process. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* [online]. 2007-1-1, 42(5): 315-324 [cit. 2015-04-10]. DOI: 10.1243/03093247JSA272. ISSN 0309-3247. Dostupné z: <http://sdj.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/03093247JSA272>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis symbolu	Jednotka
A	tažnost	[%]
B	pomocná konstanta	[-]
C	uhlík	[-]
Cr	chrom	[-]
D	modul zpevnění	[MPa]
D'	lineární deformační stopa	[-]
D''	reálná deformační stopa	[-]
\bar{D}	konečný průměr zakrouženého vzorku	[mm]
D_M	mezní průměr příruby	[mm]
$D_{stř}$	celková střední hodnota průměru	[mm]
$D_{úhel,stř}$	střední hodnota průměru v daném místě	[mm]
D_0	průměr polotovaru	[mm]
$(D_0)_{stř}$	střední průměr trubky	[mm]
d_0	průměr kružnice deformační sítě	[mm]
e	Eulerovo číslo	[-]
F	zatěžující síla	[N]
F_o	síla potřebná pro ohyb	[N]
H	konečná výška výlisku	[mm]
K	materiálová konstanta	[MPa]
L	délka polotovaru	[mm]
L_C	celková délka trubky	[mm]
L_N	délka trnu nástroje	[mm]
l	rozvinutá délka středního vlákna příruby	[mm]
l_0	rozvinutá délka středního vlákna trubky	[mm]
l_1	délka delší osy elipsy	[mm]
l_2	délka kratší osy elipsy	[mm]
Mn	mangan	[-]
Ni	nikl	[-]
n	součinitel zpevnění	[-]
P	fosfor	[-]
R_{KR}	kritický poloměr příruby	[mm]
R_M	mezní poloměr příruby	[mm]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
\bar{R}_m	rádus nástroje	[mm]
R_N	neutrální poloměr	[mm]
$R_{p0,2}$	mez kluzu	[MPa]
R_V	konečný poloměr příruby	[mm]
R_x	obecný poloměr příruby	[mm]
R_ρ	poloměr sféry	[mm]
r	poloměr na konci rádiusu	[mm]
r_m	vnitřní poloměr ohybu trubky	[mm]
r_s	poloměr středního vlákna	[mm]
r_0	počáteční poloměr trubky	[mm]

S	síra	[—]
Si	křemík	[—]
s	dráha stroje	[mm]
t	tloušťka stěny trubky	[mm]
t_r	tloušťka stěny trubky na konci rádiusu	[mm]
$t_{stř}$	celková střední hodnota tloušťky	[mm]
$t_{úhel, stř}$	střední hodnota tloušťky v daném místě	[mm]
t_V	konečná tloušťka hrany příruby	[mm]
t_x	tloušťka stěny trubky v obecné poloze příruby	[mm]
t_0	počáteční tloušťka stěny trubky	[mm]
V_{kon}	konečný objem	[mm^3]
$V_{poč}$	počáteční objem	[mm^3]
V_1	objem materiálu v ohybové části	[mm^3]
V_2	objem materiálu v oblasti příruby	[mm^3]
x	vzdálenost středu elipsy od okraje příruby	[mm]
Z	zúžení	[%]

α	úhel hrdla	[°]
β	korekční koeficient podmínek plasticity	[—]
Δ	potřebná délka vzorku nutná pro vytvoření lemu	[mm]
δ	přídavek na délku vzorku	[mm]
ε	poměrná deformace	[—]
φ_M	logaritmická deformace na mezi pevnosti	[—]
ε_n	normálová poměrná deformace	[—]
ε_r	radiální poměrná deformace	[—]
ε_t	tangenciální poměrná deformace	[—]
ε_θ	obvodová poměrná deformace	[—]
λ	přírůstek na poloměr	[mm]
μ	koeficient tření	[—]
π	Ludolfovo číslo	[—]
σ	napětí	[MPa]
σ_{ef}	napětí	[MPa]
$(\sigma_d)_c$	celkový deformační odpor	[MPa]
σ_k	napětí na mezi kluzu	[MPa]
σ_{ke}	extrapolovaná mez kluzu	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

1	Příklady tváření trubek [4], [24], [25], [26],	10
2	Tvary zakončení trubek [20]	11
3	Varianty polohy činného nástroje [10]	11
4	Základní rozměry polotovaru a výlisků	12
5	Příklady procesu rozšiřování [20]	13
6	Vyznačení kritických míst [20]	13
7	Schéma tváření ploché příruby [9]	14
8	Deformační schémata [20]	14
9	Schéma tváření ploché příruby	16
10	Schéma tváření kuželové příruby [9]	17
11	Deformační schémata	17
12	Schéma geometrie elementu	17
13	Vyznačení nejčastějších defektů [20]	19
14	Směr vláken materiálu	19
15	Průběh zpětného zakroužení konce trubky	20
16	Nepřavidelný konec trubky	20
17	Příklady deformačních sítí [7]	20
18	Rozměry elementu sítě [19]	21
19	Keeler-Goodwinův diagram [15]	21
20	Vyznačení deformačních stop [19]	21
21	Geometrie vzorku	22
22	Aproximační křivka dle Ludwig-Holomona [8]	24
23	Schéma pro výpočet délky vzorku ploché příruby	25
24	Schéma pro výpočet délky vzorku kuželové příruby	26
25	Uspořádání měření kruhovitosti	27
26	Vyznačení měřených míst	27
27	Znázornění naměřené kruhovitosti vzorků, plochá příruha	28
28	Znázornění naměřené kruhovitosti vzorků, kuželová příruha	28
29	Nástroj ze dvou částí	29
30	Nástroj z jedné části	29
31	Detail kalibrační části	30
32	Nástroj konečný tvar	30
33	Deformační síť	30
34	Proces tváření	31
35	Vzorek - L1	31
36	Vzorek - L1: Průběh zatěžující síly	32
37	Schéma zakroužení	32
38	Vzorek - L2	32
39	Vzorek - L2: Průběh zatěžující síly	33
40	Vzorek - L3	33
41	Nákres realizace experimentu s přidržovačem	34
42	Schéma zastavování experimentu	35
43	Vzorek - K1	35
44	Vzorek - K1: Průběh zatěžující síly	35
45	Vzorek - K2	36

46	Vzorek - K2: Průběh zatěžující síly	36
47	Vzorek - K3	36
48	Vzorek - K3: Průběh zatěžující síly	36
49	Vzorek - K4	36
50	Vzorek - K4: Průběh zatěžující síly	36
51	Vzorek - K5	37
52	Vzorek - K5: Průběh zatěžující síly	37
53	Vzorek - K6	37
54	Vzorek - K6: Průběh zatěžující síly	37
55	Porovnání průběhů zatěžující síly	38
56	Vrub	38
57	Výsledný vzorek s vrubem	38
58	Druhý vzorek s vrubem	39
59	Průběhy zatěžující síly pro vzorky s vrubem	39
60	Detail deformované sítě	41
61	Uspořádání a volba elips	42
62	Určení průměru středu elips	42
63	Schéma pro určení rozvinuté délky	43
64	Výsledné deformační stopy	46
65	Průběh tloušťky vypočítaný k deformační sítě	46
66	Závislost σ_{ef} na φ_{ef}	48
67	Závislost σ_{ef} na R	48
68	Závislost σ_1 na R	48
69	Průběh tloušťky pro kuželovou přírubu	52
70	Průběh napětí pro kuželovou přírubu	52
71	Porovnání průběhů tlouštěk	53

SEZNAM TABULEK

1	Chemické složení materiálu 1.4301	22
2	Mechanické vlastnosti materiálu 1.4301	22
3	Materiálové konstanty	22
4	Rozměry vzorků	27
5	Výsledky měření kruhovitosti pro plochou přírubu	27
6	Výsledky měření kruhovitosti pro kuželovou přírubu	28
7	Střední hodnoty tloušťky stěny vzorků pro plochou přírubu	28
8	Střední hodnoty tloušťky stěny vzorků pro kuželovou přírubu	29
9	Tloušťka ploché příruby	34
10	Koncový průměr ploché příruby	34
11	Tloušťka kuželové příruby	40
12	Koncový průměr kuželové příruby	40
12	Koncový průměr kuželové příruby (pokračování)	41
13	Naměřené hodnoty elips	42
14	Poloměr středního vlákna na konci příruby	43
15	Výsledné tahové napětí a poměrná deformace	43

16	Vypočítané průměry příruby v místě středů elips	44
17	Procentuální navýšení délky l_1	44
18	Vypočtené hodnoty deformací	45
19	Hodnoty tloušťky určené pomocí deformační sítě	46
20	Vypočtené hodnoty napětí	47
21	Porovnání výsledných sil	50
22	Koncový průměr kuželové příruby	52

SEZNAM VÝKRESŮ

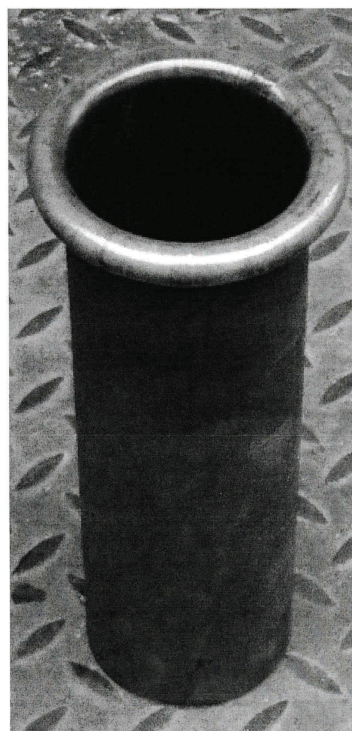
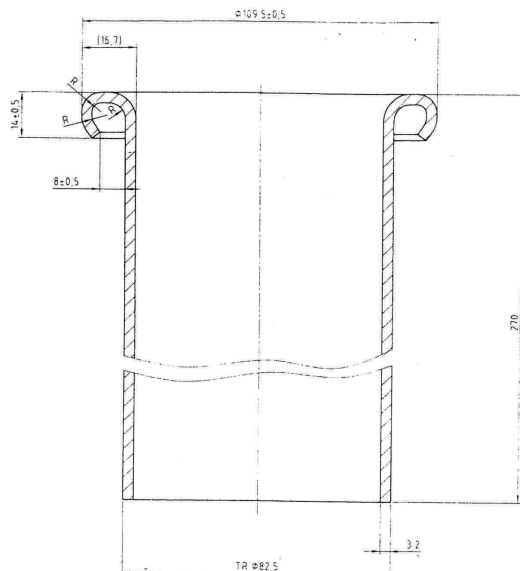
03-DP-2015-01	Plochý lisovník
03-DP-2015-02	Kuželový lisovník

SEZNAM PŘÍLOH

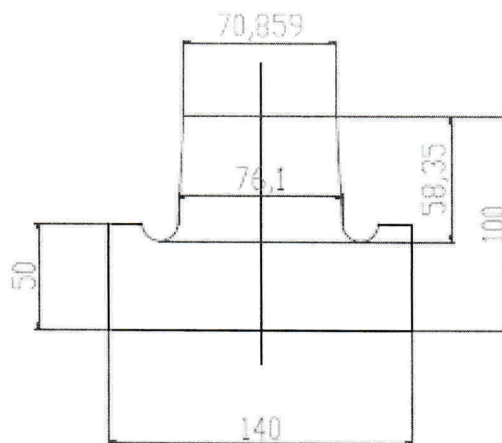
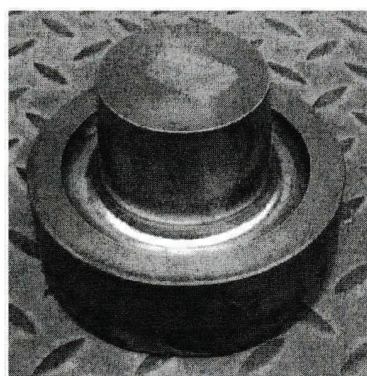
1. Příklad vyráběné součástky
2. Tabulka naměřených hodnot počáteční tloušťky stěny vzorku
3. Hydraulický zkušební stroj *ZD40 /400kN4/*

1. Příklad vyráběné součástky

OCHRANNÁ VLOŽKA



LISOVACÍ PŘÍPRAVEK



2. Tabulka naměřených hodnot počáteční tloušťky stěny vzorku

Uvedené hodnoty v tabulkách jsou v *mm*.

č. vzorku	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1	1,40	1,42	1,40	1,40	1,42	1,41	1,43	1,43
	1,40	1,42	1,39	1,39	1,40	1,41	1,44	1,43
	1,40	1,41	1,39	1,40	1,40	1,40	1,43	1,43
2	1,42	1,40	1,40	1,44	1,40	1,40	1,43	1,43
	1,41	1,41	1,40	1,45	1,40	1,40	1,43	1,43
	1,41	1,40	1,40	1,41	1,41	1,40	1,43	1,43
3	1,40	1,42	1,43	1,43	1,40	1,41	1,43	1,41
	1,42	1,41	1,42	1,42	1,40	1,41	1,40	1,40
	1,42	1,43	1,43	1,42	1,41	1,41	1,40	1,39
4	1,42	1,43	1,42	1,40	1,39	1,40	1,43	1,39
	1,42	1,42	1,40	1,39	1,39	1,41	1,43	1,38
	1,41	1,42	1,41	1,40	1,39	1,43	1,43	1,40

č. vzorku	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1	1,41	1,40	1,41	1,42	1,43	1,39	1,41	1,40
	1,39	1,40	1,42	1,40	1,41	1,39	1,41	1,40
	1,41	1,43	1,41	1,42	1,42	1,39	1,41	1,41
2	1,39	1,41	1,41	1,42	1,43	1,41	1,42	1,40
	1,39	1,40	1,40	1,41	1,41	1,43	1,41	1,41
	1,39	1,41	1,41	1,41	1,41	1,42	1,41	1,39
3	1,40	1,39	1,40	1,43	1,42	1,43	1,43	1,40
	1,42	1,39	1,40	1,40	1,42	1,42	1,41	1,40
	1,40	1,41	1,41	1,42	1,41	1,42	1,41	1,41
4	1,40	1,40	1,41	1,43	1,44	1,40	1,41	1,40
	1,40	1,41	1,42	1,42	1,42	1,39	1,40	1,40
	1,39	1,39	1,41	1,42	1,42	1,39	1,40	1,39

3. Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN4/

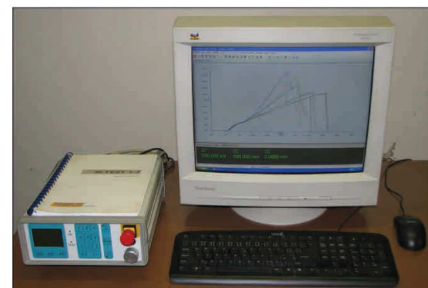
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropské výrobci univerzálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60