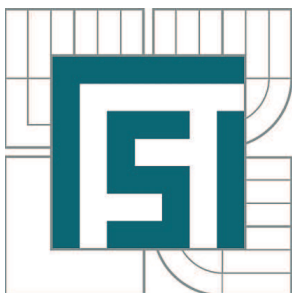


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## MOŽNOSTI ZAMEZENÍ VZNIKU DEFEKTŮ PŘI OHÝBÁNÍ TRUBEK

PREVENTION OF DEFECTS DURING TUBE BENDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LIBOR PROCHÁZKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. EVA PETERKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Libor Procházka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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 bakalářské práce:

### **Možnosti zamezení vzniku defektů při ohýbání trubek**

v anglickém jazyce:

#### **Prevention of defects during tube bending**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při ohýbání trubek dochází k různým defektům, kterým je nutno předejít, popřípadě jejich míru co nejvíce snížit. Daná práce je zaměřena na popis těchto defektů a především na metody, které se pro danou problematiku používají.

Cíle bakalářské práce:

Provedení průzkumu v oblasti tváření trubek ohybem a vytvoření obecného přehledu defektů, ke kterým při ohýbání dochází.

Přehled a popis možností zabránění vzniku defektů nebo alespoň snížení jejich míry.

Pro každou možnost vytvořit přehled užívaných nástrojů, medií, přípravků atd.

Vlastní hodnocení a závěry.

Vše bude doloženo obrázkovou dokumentací.

Seznam odborné literatury:

1. SAMEK, Radko, Zdeněk, LIDMILA a Eva, ŠMEHLÍKOVÁ. Speciální technologie tváření: Část II. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4406-5.
2. SCHULER GmbH. Handbuch der Umformtechnik. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. ISBN 3-540-61099-5.
3. TSCHAETSCH, Heinz. Metal Forming Practise: Process - Machines - Tools. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2006. ISBN 3-540-33216-2.
4. LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření I. 1. vyd. Brno: Vydavatelské oddělení UO, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Peterková, Ph.D.

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

V Brně, dne

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce popisuje nejčastěji se objevující defekty vznikající při ohýbání dílců trubek. První část bakalářské práce se věnuje podrobnému průzkumu těchto nežádoucích jevů. V druhé části je uveden komplexní výčet možností redukce defektů. Pro jednotlivé eliminační metody je uvedena vhodnost a podmínky použití. Závěrem práce je potom přiřazení možností eliminace k jednotlivým typům defektů.

### **Klíčová slova**

Ohýbání trubek, defekt, odstranění, výplň

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis describes the most occurring defects of tube's component bending. The first part of this thesis is focused on a detailed research of these unwanted phenomenons. The second part contains complete list of possibilities in the defects reduction. There are quoted the suitability and the terms of use for an individual eliminative methods in the second part of this thesis, too. The last part of this bachelor thesis contains classifying of elimination possibilities to the particular types of defects.

### **Key words**

Tube bending, defect, elimination, filling

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PROCHÁZKA, Libor. *Možnosti zamezení vzniku defektů při ohýbání trubek*. Brno, 2015. 28 s., 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Možnosti zamezení vzniku defektů při ohýbání trubek vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně 20. 5. 2015

.....  
Libor Procházka

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji paní Ing. Evě Peterkové, Ph.D. za vstřícnost a cenné rady, díky nimž mohla tato bakalářská práce vzniknout.

# OBSAH

Zadání  
Abstrakt  
Bibliografická citace  
Čestné prohlášení  
Poděkování  
Obsah

<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>1 DRUHY DEFEKTŮ PŘI OHÝBÁNÍ TRUBEK .....</b>	<b>9</b>
1.1 ZPLOŠTĚNÍ PRŮŘEZU .....	9
1.1.1 Princip vzniku .....	10
1.1.2 Možné příčiny .....	11
1.1.3 Důsledky .....	11
1.1.4 Vyhodnocení .....	12
1.2 ZVLNĚNÍ STĚNY .....	13
1.2.1 Princip vzniku .....	14
1.2.2 Důsledky .....	14
1.2.3 Vyhodnocení .....	14
1.3 ZTENČENÍ STĚNY .....	15
1.3.1 Princip vzniku .....	15
1.3.2 Důsledky .....	16
1.3.3 Vyhodnocení .....	16
1.4 ODPRUŽENÍ .....	17
1.4.1 Princip vzniku .....	17
1.4.2 Důsledky .....	18
1.4.3 Vyhodnocení .....	18
<b>2 MOŽNOSTI ELIMINACE DEFEKTŮ .....</b>	<b>20</b>
2.1 REDUKCE ZPLOŠTĚNÍ .....	25
2.2 ZABRÁNĚNÍ ZVLNĚNÍ .....	26
2.3 ELIMINACE ZTENČENÍ .....	26
2.4 ZMENŠENÍ ODPRUŽENÍ .....	27
<b>3 ZÁVĚRY .....</b>	<b>28</b>

Seznam použitých zdrojů  
Seznam použitých symbolů a zkratk  
Přílohy

## ÚVOD [1], [3], [5], [6], [7], [8], [9], [14], [24]

Trubky jsou nepostradatelné konstrukční prvky hojně využívané ve všech průmyslových odvětvích, kterými jsou například stavebnictví, strojírenství, energetický průmysl a další. Z důvodu montáže nebo funkce jsou jednotlivé dílce trubek ohýbány buď na strojních ohýbačkách, nebo ručně (s využitím přípravků). Trubky je možno ohýbat v jedné, ale i ve více rovinách.

Při nedodržení vhodných technologických vazeb mezi tloušťkou stěny trubky, vnějším průměrem trubky a poloměrem ohybu dochází zpravidla při ohýbání ke vzniku nežádoucích deformací materiálu. Mezi defekty patří zejména ztenčení stěny trubky vlivem tahového napětí na vnější straně ohybu, dále zvlnění stěny na vnitřním poloměru ohybu způsobené tlakovým napětím, odpružení trubky po ohnutí způsobené pružnou deformací materiálu a ovalita průřezu ohýbané trubky.

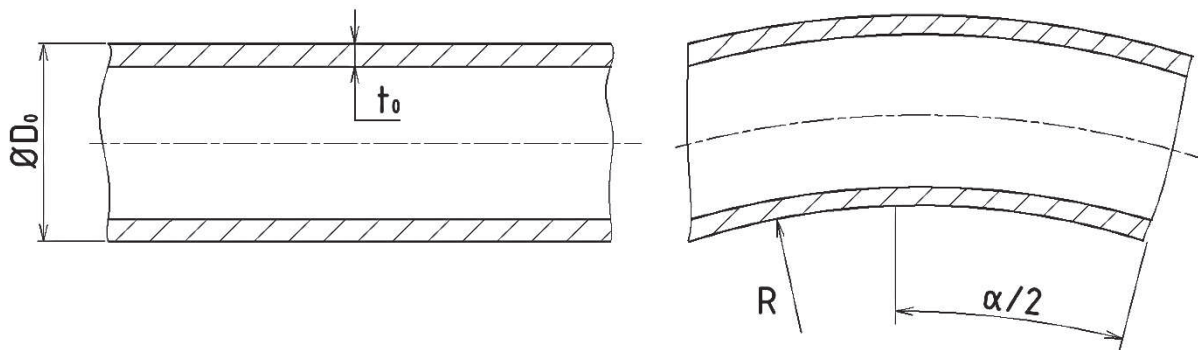
Při výrobě přesných a pevnostně konstantních dílců z trubek ohýbáním je proto nutné defekty minimalizovat. Mezi základní možnosti eliminace vzniku defektů patří naplnění dutiny trubky výplní, užití stabilizačních vložek nebo ohýbání s přidavnou tlakovou osovou silou.



Obr. 1 Příklady využití ohýbaných trubek v praxi [5], [6], [7], [8], [9]

# 1 DRUHY DEFEKTŮ PŘI OHÝBÁNÍ TRUBEK [1], [2], [26]

Před samotným ohýbáním je třeba si uvědomit, kde a za jakých podmínek bude součást v praxi použita. Zda je nezbytné, aby byla trubka bez vady, anebo jsou některé defekty v přípustných mezích povoleny. Dále je nutné zohlednit geometrii tvářeného dílce, tzv. parametry procesu ohybu, kam se kromě minimálního poloměru ohybu „ $R_{min}$ “ řadí také kritéria technologičnosti stávající se z relativní tloušťky stěny „ $t_0/D_0$ “ a relativního poloměru ohybu „ $R/D_0$ “.



Obr. 1.1 Geometrie ohýbaného dílce trubky [1]

Pokud nejsou dodrženy minimální doporučené parametry procesu ohybu pro daný materiál, dochází při samotném tváření k negativním jevům, které se projevují ve formě defektů, a to:

- zploštění kruhového průřezu (ovalita),
- zvlnění stěny v oblasti vnitřního poloměru ohybu,
- ztenčení stěny trubky v oblasti vnějšího poloměru ohybu,
- odpružení trubky po ohybu.

K těmto defektům nejčastěji dochází během zmenšování poloměru ohybu trubky „ $R$ “, při zvětšování jejího průměru „ $D_0$ “ (skokovou změnou, nebo plynulým přechodem), či za zeslabování tloušťky stěny polotovaru „ $t_0$ “.

## 1.1 ZPLOŠTĚNÍ PRŮŘEZU [1], [17], [34]

Během ohýbání trubky dochází k zploštění jejího kruhového průřezu, které je definováno jako odchylka od počáteční kruhovitosti průřezu trubky. V literatuře zabývající se tváření dílců s mezikruhovým průřezem se často uvádí termín ovalita. Což je označení zavedené pro zjednodušení výpočtu a snadnou představu deformace průřezu, kde se uvažuje změna kruhového průřezu na eliptický neboli oválný.

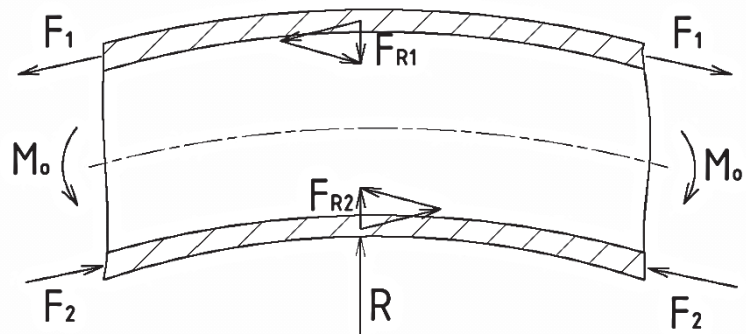
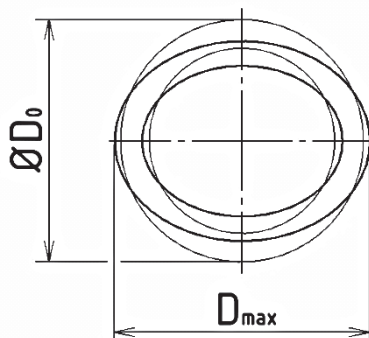


Obr. 1.2 Ovalita trubek a její měření [12], [13]

Při nakupování ohnutého dílce trubky bývá výrobcem garantována maximální hodnota velikosti zploštění, vyjádřená koeficientem ovality „ $K_0$ “ v procentech.

### 1.1.1 PRINCIP VZNIKU [1], [3], [15]

Při ohýbání trubky s konstantním průřezem, bez vrubů a vad materiálu dochází k největšímu zploštění většinou ve střední části ohybu, tj. v místech působení největších ohybových momentů „ $M_0$ “. Velikost opěrného tlaku od ohybníku a ohýbací matrice také přispívá k výsledné ovalitě, ale z důvodu názornosti a jednoduššího pochopení principu vzniku tohoto defektu nebude uvažován. Ovalitu lze popsat na základě rozkladu vnitřních sil v prostoru. Působením „ $M_0$ “ vznikají v průřezu trubky tlaková a tahová napětí, jejichž přechod je vymezen neutrální osou. Těmito napětím odpovídají vnitřní tahové síly „ $F_1$ “ působící ve stěně trubky na vnějším poloměru ohybu a vnitřní tlakové síly „ $F_2$ “ působící na vnitřním poloměru ohybu. Složením těchto sil vzniknou radiální síly, které směřují proti sobě a způsobují tak zploštění průřezu neboli ovalitu.



Obr. 1.3 Geometrie zploštěného průřezu [1] Obr. 1.4 Zatížení vnitřními silami [1]

Zplošťování je provázáno přesunem materiálu po ohýbaném průřezu tak, že tloušťka stěny trubky v tahové oblasti bude tenčí oproti původnímu stavu a naopak tloušťka stěny trubky v tlakové oblasti zesílí.

### 1.1.2 MOŽNÉ PŘÍČINY [1], [16], [27], [28]

Ke zploštění kruhového profilu trubky nejčastěji dochází při:

- a) vnějším silovém zatížení
- b) procesu ohýbání

Ad a) Tento defekt vzniká nejčastěji u nekovových trubek podzemních potrubních systémů, např. u potrubí z polyethylenu, jak je ukázáno na obr. 1.5. Jako vnější silové zatížení je zde myšleno statické nebo dynamické zatížení vyvolávající tlak, který působí současně vně na dvě protilehlé stěny potrubí. V okamžiku, kdy velikost tlaku překročí kritickou hodnotu, začne se potrubí zplošťovat. Toto silové působení bývá nejčastěji tvořeno spojitým zatížením vrstvy zeminy nacházející se nad inženýrskými sítěmi (voda, plyn, odpadní stoka). Na rozdíl od ovality způsobené ohybem se zploštěná část potrubí nedělí na oblasti ovality, ale hledá se nejdeformovanější průřez, ze kterého se poté stanoví životnost celého potrubí.



Obr. 1.5 Ovalita potrubí z polyethylenu [28]

Ad b) Se zvětšujícím se úhlem ohybu „ $\alpha$ “ (obr.1.1) dochází k nárůstu velikosti radiálních sil, a to má za následek i zvětšování ovality průřezu tvářené trubky. Což lze vidět na obr. 1.6. Dalším způsobem ovlivnění velikosti zploštění je věnována kapitola 2.1.

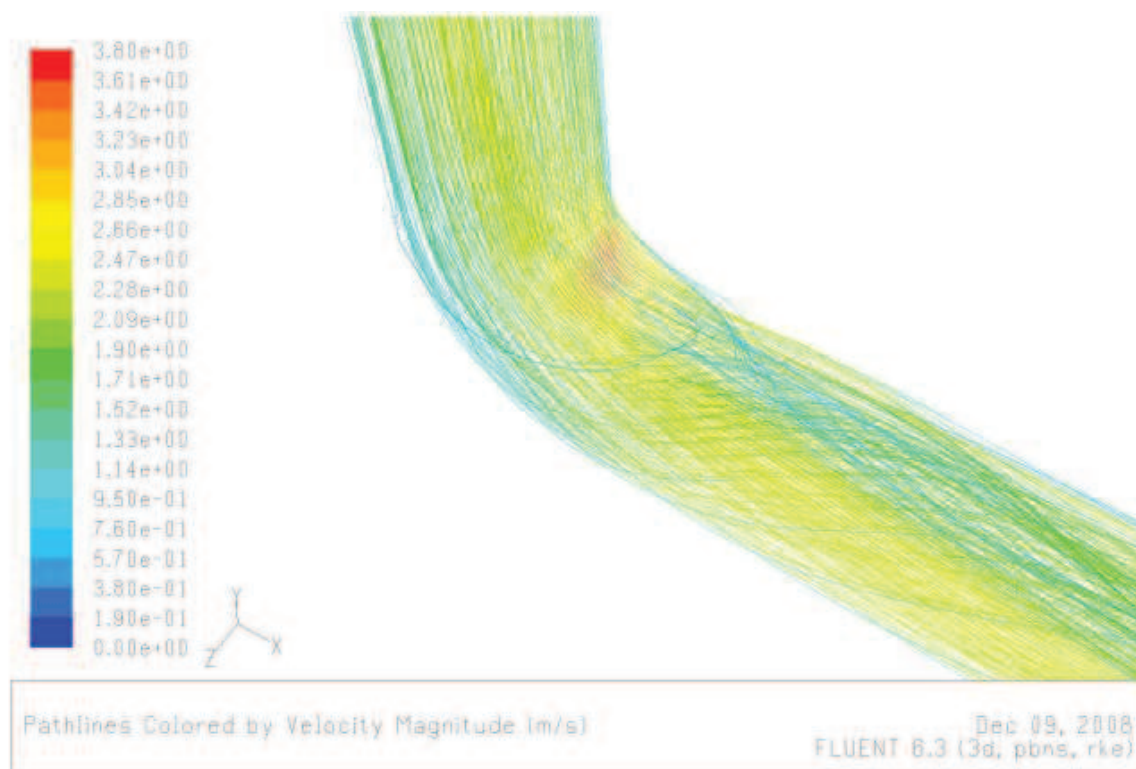


Obr. 1.6 Ovalita ocelových trubek [16]

### 1.1.3 DŮSLEDKY [1], [18], [19]

Zejména u potrubí zajišťujícího transport kapalného média je velmi důležitá geometrie zakřivené části dílce. Mezi její nejdůležitější parametry patří poloměr ohybu „ $R$ “ (obr. 1.3), jakožto i minimální poloměr křivosti „ $R_{min}$ “, při němž paprsek proudícího média ještě plynule sleduje zakřivení potrubí a průměr „ $D_0$ “ (obr. 1.3).

Na základě provedené studie proudění kapaliny zakřiveným potrubím [19] byly zjištěny mezní parametry bezpečného proudění. Při poměru „ $R_{min}/D_0$ “= 2 je ještě zakřivení potrubí plynule sledováno paprskem proudícího média. Je-li poloměr křivosti menší než dva průměry, čili „ $R_{min}/D_0$ “ < 2, tak se proud odráží od protější stěny kolena nebo oblouku. Dochází k zvětšení tlaku u vnější stěny a snížení tlaku u vnitřní stěny, což zapříčiňuje zkrácení životnosti potrubí.



Obr. 1.7 Průtok zakřiveným potrubím [19]

Na obr. 1.7 lze vidět dráhy proudnic média při průtoku ohnutou částí trubky. Velikost rychlosti toku je znázorněna barevně, přičemž hodnoty rychlostí jsou k barvám přiřazeny v levé části obrázku.

#### 1.1.4 VYHODNOCENÍ [1], [3], [20], [21], [22], [23], [38], [39]

Určení velikosti zploštění ohnuté trubky se provádí pomocí koeficientu ovality „ $K_o$ “, který posuzuje změnu kruhového průřezu v eliptický, a je dán vztahem:

$$K_o = \frac{D_{max} - D_0}{D_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1.1)$$

... kde vnější průměr trubky před ohybem „ $D_0$ “ [mm] (obr. 1.3) se určuje na nedeformované části trubky pomocí měřidel, jako jsou mikrometry a posuvná měřidla. Maximální hodnota zploštění „ $D_{max}$ “ [mm] (obr. 1.3) se měří na více místech, ve dvou na sebe kolmých směrech, po 45°. Například pro ohýbané komponenty trubek používaných v leteckých motorech je dle ČSN EN 3658, [38] přípustná ovalita max. 10 %. Dovolené hodnoty zploštění se kontrolují průchodem normované kuličky.

Norma ČSN EN 13 480-4, [39] udává pro trubky zatěžované vnitřním tlakem jiný parametr, tzv. nekruhovitosť „u“ definovanou jako:

$$u = \frac{2 \cdot (D_{\max} - D_{\min})}{D_{\max} + D_{\min}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1.2)$$

Kde minimální hodnota velikosti zploštění „ $D_{\min}$ “ je odečtena během měření „ $D_{\max}$ “.

Při rozboru působení vnitřních sil je možné hodnoty radiálních sil „ $F_{r1,2}$ “ (obr. 1.4) v tlakové i tahové oblasti stanovit početně. Tyto lze na plochách „ $S_{1,2}$ “ v závislosti na sinu úhlu ohybu „ $\alpha$ “ (obr. 1.1) a hodnotě napětí „ $\sigma_p$ “ určit následujícími vztahy:

$$F_{r1} = 2 \cdot \sigma_p \cdot S_1 \cdot \sin(\alpha/2) \text{ [N]} \quad (1.3)$$

$$F_{r2} = 2 \cdot \sigma_p \cdot S_2 \cdot \sin(\alpha/2) \text{ [N]} \quad (1.4)$$

Příčměž plochou průřezu „ $S_1$ “ se udává velikost tahové oblasti, která bývá větší než oblast tlaková „ $S_2$ “, a „ $\sigma_p$ “ je přetvárný odpor materiálu.

## 1.2 ZVLNĚNÍ STĚNY [1], [10], [15], [36]

Při ohýbání trubek se může zvýšit velikost napětí ve stěně na vnitřním poloměru ohybu nad hodnotu kritického napětí vzpěrné stability „ $\sigma_{cr}$ “. V důsledku toho je materiál trubky plasticky deformován do tvaru vln.



Obr. 1.8, 1.9 Příklady nežádoucího zvlnění [10], [36]

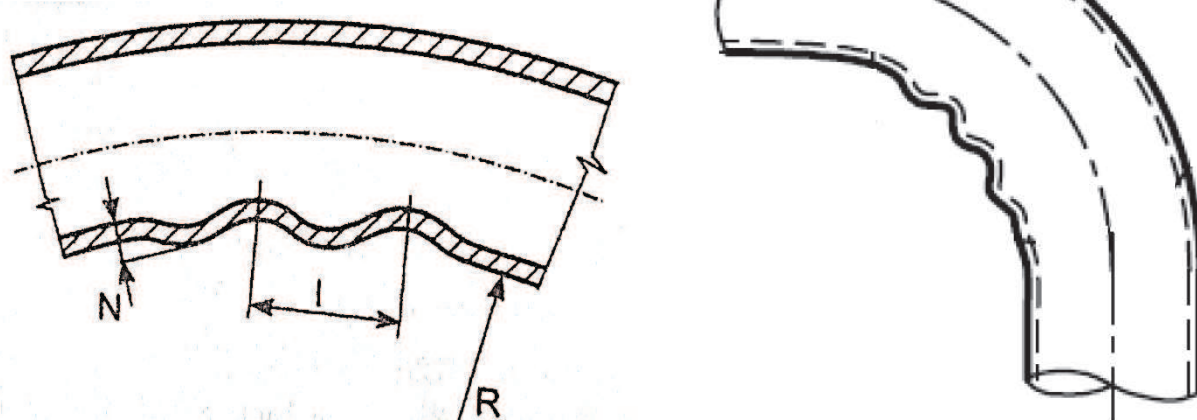
Tento jev, kterému bývá snahou předejít se nazývá zvlnění stěny trubky na vnitřním poloměru ohybu.

### 1.2.1 PRINCIP VZNIKU [3], [4], [29]

Během ohýbání trubek dochází k přesunu materiálu z tahové oblasti do tlakové jak v obvodovém, tak i podélném směru. Důsledkem je pak ztenčování stěny na vnější straně ohybu a nárůst tloušťky – pěchování – na vnitřní straně ohybu. Při nedodržení doporučených parametrů procesu ohybu (kap. 1) může dojít k nadměrnému zpěchování materiálu na vnitřní straně ohybu, což má za následek vznik vln. Tento proces se nazývá zvlnění stěny trubky v oblasti vnitřního poloměru ohybu a je projevem ztráty stability poměrně tenké stěny.

### 1.2.2 DŮSLEDKY [1], [30], [31]

Při zvlnění dochází v ohýbané části ke změně tvaru profilu trubky oproti původnímu, což může mít za následek kromě případného nežádoucího estetického efektu také komplikace při montáži dílce trubky. Dále pak jsou vlny nežádoucí u dílců zatížených extrémními změnami provozních tlaků a vibracemi. U takových lze očekávat degradaci materiálu v oblasti ohybu jako důsledek vzniku a šíření makroskopických únavových trhlin, které mohou vést až k únavovému lomu.



Obr. 1.10, 1.11 Geometrie zvlněné stěny trubky na vnitřním poloměru ohybu [1], [3]

### 1.2.3 VYHODNOCENÍ [1], [3], [32], [39]

Při určování míry přípustnosti defektu se u nežádoucího zvlnění měří velikost a rozteč vln „ $N$ “ a „ $l$ “, jež jsou zakótovány na obrázku 1.10. Z těchto naměřených se dále vybere nejmenší rozteč a největší velikost vln. Tyto se následně porovnávají s limitními hodnotami uvedenými podnikovými normami pro charakteristické velikosti vnitřních poloměrů ohybu „ $R$ “, poměrů vnějších a vnitřních průměrů trubek „ $D_0/d$ “. Příklad takové normy je uveden v tabulce 1.1.

Tab. 1.1 Dovolené úchytky nepřesnosti zvlnění [32]

$D_0/d$	$R$ [mm]	$N_{max}$ [mm]	$l_{min}$ [mm]
10/8	15	0.15	4.0
12/10	18	0.16	4.0
14/12	21	0.18	4.5
18/16	27	0.20	5.0
22/20	33	0.30	5.0
32/30	48	0.40	6.0
34/32	51	0.50	7.0
40/38	60	0.50	9.0

Druhou metodu vedoucí k určení přípustnosti zvlnění popisuje Evropská norma ČSN EN 13 480-4 [39], přijatá a schválená Českým normalizačním institutem „ČNI“. Podle ní je defekt v přípustných mezích, pokud jsou splněny obě následující podmínky:

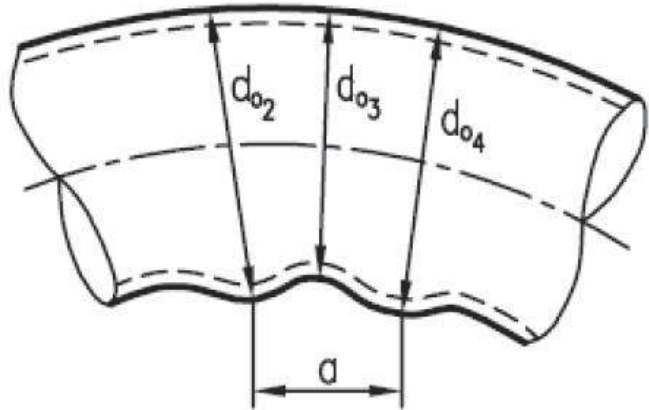
$$a) h_m \leq 0,03 \cdot D_0 \text{ [mm]} \quad (1.5)$$

Střední výška dvou sousedních vln, „ $h_m$ “ je závislá na jednotlivých průměrech „ $D_0$ “, „ $d_{02}$ “, „ $d_{03}$ “ a „ $d_{04}$ “, viz obr. 1.12.

$$h_m = \frac{d_{02} + d_{04}}{2} - d_{03} \text{ [mm]} \quad (1.6)$$

$$b) a \leq 12 \cdot h_m \text{ [mm]} \quad (1.7)$$

Kde „ $a$ “ je vzdálenost středů dvou sousedních vln.



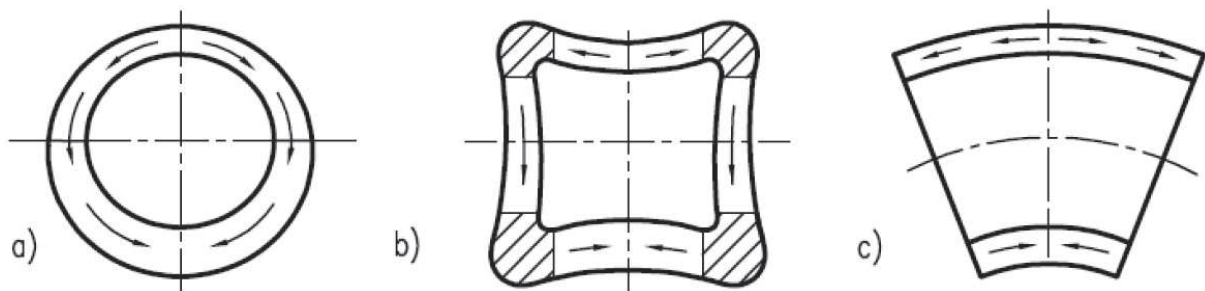
Obr. 1.12 Charakteristické rozměry zvlnění [3]

### 1.3 ZTENČENÍ STĚNY [3], [34]

Ztenčení stěny trubky v oblasti vnějšího poloměru ohybu je nežádoucí stav materiálu tvářeného dílce, který vzniká, a jehož velikost se zvětšuje během procesu ohybu. Při kritickém ztenčení stěny dochází ke vzniku trhlin na povrchu trubky. Způsoby regulace defektu jsou uvedeny v kapitole 2.3 („Eliminace ztenčení“).

#### 1.3.1 PRINCIP VZNIKU [1], [32], [34]

Při každé operaci ohýbání je oblast tvářeného materiálu, nacházející se na vnějším poloměru ohybu natahována, a naopak zóna ležící na vnitřním poloměru ohybu stlačována. Stejně tak během ohýbání dílců trubek vzniká na vnější straně ohybu tahové napětí, jehož velikost roste se zmenšováním poloměru ohybu „ $R$ “, případně se zvětšováním průměru trubky „ $D_0$ “ (oba obr. 1.1). Současně dochází k přesunu materiálu průřezem z horní „tahové oblasti“ do „oblasti tlakové“, což vede ke ztenčování tloušťky stěny [1].



Obr. 1.13 Zobrazení toku materiálu během ohybu [3]

Tečení materiálu v podélném směru ohybu trubky, vzhledem k působícímu napětí lze vidět na obr. 1.13c. Tok dutým čtvercovým a kruhovým průřezem znázorňuje obr. 1.13b a 1.13a.

### 1.3.2 DŮSLEDKY [1], [34]

Přílišné ztenčení tloušťky stěny trubky vede k nerovnoměrnému rozložení materiálu po průřezu, což způsobuje degradaci mechanických vlastností součásti oproti stavu, kdy byl defekt držen v přípustných mezích. Pokud nejsou dodrženy doporučené parametry procesu ohybu, může v krajních případech hodnota tahového napětí ve ztenčované stěně trubky dosáhnout meze pevnosti, čímž se vyčerpá plasticita materiálu a dochází ke vzniku trhliny.

### 1.3.3 VYHODNOCENÍ [1], [3], [34], [36], [37], [38], [39]

Kontrola a závěry o tom, zda ohyb proběhl podle očekávání a hodnota ztenčení se pohybuje v dovolených mezích se provádí až po skončení procesu ohybu. V zahraniční literatuře se pro tuto veličinu podobně jako koeficient ovality „ $K_o$ “, objevuje koeficient ztenčení stěny „ $K_z$ “ v procentech [3], definován jako:

$$K_z = \frac{t_0 - t}{t_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1.8)$$

Kde síla stěny vyšetřovaného místa „ $t$ “ bývá po ohybu měřena ultrazvukovým tloušťkoměrem, či prozářením a hodnota „ $t_0$ “ udává výchozí tloušťku stěny trubky (obr. 1.1). Například v [3] se uvádí, že pro trubky leteckých motorů dle ČSN EN 3658, [38] je maximální přípustné zeslabení stěny 10 %. V jiné literatuře [1] se udává, že maximální přípustné ztenčení ohýbaných trubek instalačních systémů nesmí překročit 25 % původní tloušťky stěny.

Minimální přípustná síla stěny trubky se dá stanovit analyticky ještě před samotným ohybem. V literatuře [3] je publikováno, že dle ČSN EN 13 480-4, [39] nesmí minimální tloušťka stěny trubky „ $t_{min}$ “ klesnout pod hodnotu, kterou uvádí výpočet:

$$t_{min} = t_0 \cdot \left(1 - \frac{D_0 - t_0}{2R}\right) \text{ [mm]} \quad (1.9)$$

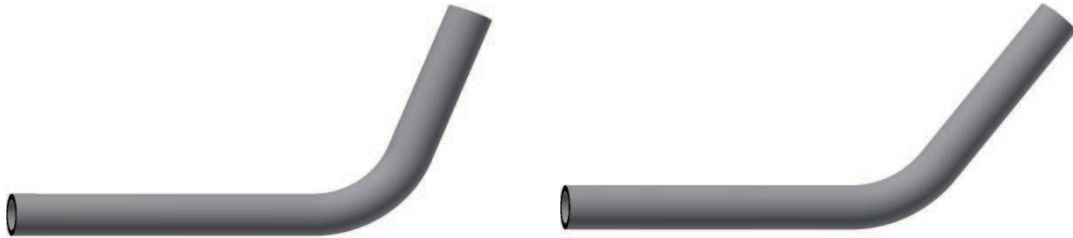
Z tohoto vztahu je patrné, že redukcí poloměru ohybu „ $R$ “, nebo případným zvětšením průměru trubky „ $D_0$ “ při konstantním „ $t_0$ “, velikost ztenčování stěny trubky roste. Jiný způsob je uveden v [34], kde se tvrdí, že pro určení „ $t_{min}$ “ lze užít následující vztah:

$$t_{min} = t_0 \cdot \left(\frac{2R}{2R + D_0}\right) \text{ [mm]} \quad (1.10)$$

Z porovnání obou eventualit k určení velikosti „ $t_{min}$ “ vyplývá, že se vzájemný rozdíl mezi výsledky získanými vztahy 1.9 a 1.10 pohybuje v řádu jednotek procent. Přičemž druhý zmíněný vztah generuje hodnoty vyšší, tzn. požaduje, aby tloušťka stěny trubky v oblasti dominantního ztenčení (na vnější straně ohybu) byla větší, než u vztahu 1.9. Tím pádem je vztah 1.10 z hlediska pevnosti bezpečnější.

## 1.4 ODPRUŽENÍ [3], [35]

S tímto jevem je nutné počítat nejčastěji při ohýbání trubek za studena, kdy po skončení procesu ohybu s odtížením ohybového momentu „ $M_o$ “ (obr 1.4) dojde k samovolné změně tvaru součásti. Tento proces, jemuž bývá snahou předejít se nazývá odpružení po ohybu.

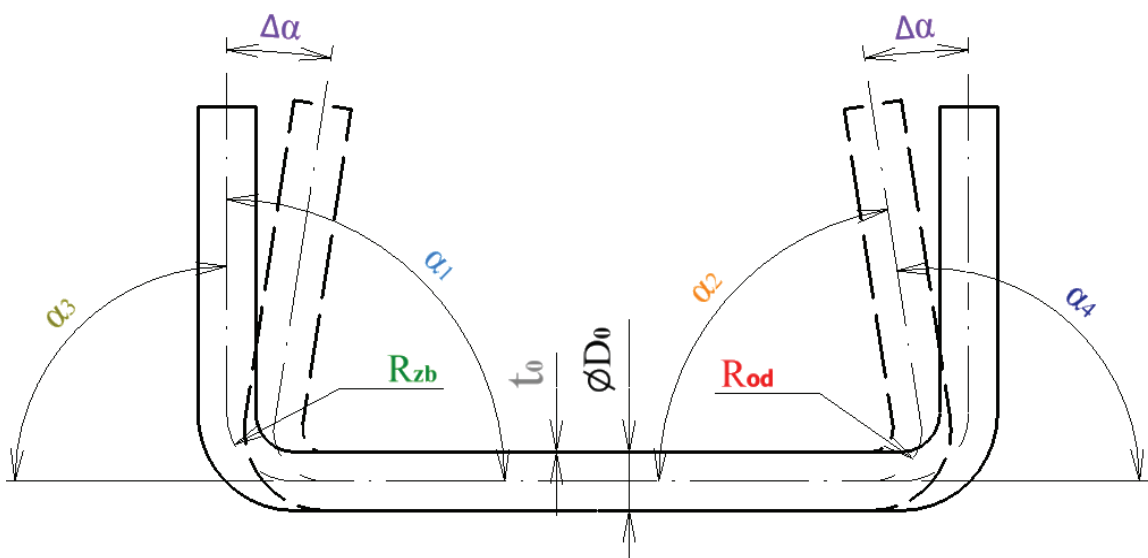


Obr. 1.14, 1.15 Odpružení při ohybu [3]

Na obr. 1.14, 1.15 lze vidět ohyb trubky kruhového profilu, kde na prvním jmenovaném je znázorněna trubka po ohybu před odpružením, zatímco na obr. 1.15 je zachycen výsledný tvar součásti po ohybu (zbytková křivost). Velikost odpružení se pohybuje řádově v jednotkách procent.

### 1.4.1 PRINCIP VZNIKU [2], [32], [40]

Schopnost materiálu změnit svůj tvar po ohybu o úhel odpružení „ $\Delta\alpha$ “ proti směru, ve kterém byl tvářen je způsobena plastickými vlastnostmi materiálu trubky. Z těchto se jako pro ohyb nejvýznamnější uvádějí, mez kluzu „ $R_e$ “, kvadratický moment průřezu „ $I$ “ a modul pružnosti materiálu v tahu „ $E$ “. Tyto se mění spolu s chemickým složením dílců, jejich profilem a provozními podmínkami ohybu (teplota, druh a časový průběh zatěžování, rychlost deformace a okolní prostředí). Podstata odpružení je popsána 5. zákonem základní plastické deformace. Zákon pružného odlehčení plasticky deformovaného tělesa vyskytující se v literatuře [40], zní: je-li plastická deformace přerušována odlehčením a opětovným zatížením, aniž se mění charakter a způsob zatížení, diagram závislosti deformace na napětí si zachovává svůj původní tvar.



Obr. 1.16 Geometrie ohybu do tvaru U [15]

### 1.4.2 DŮSLEDKY [1], [3], [15], [32]

V důsledku odpružení trubky nesouhlasí tvar nástroje a výsledný tvar součásti, což může vést k neschopnosti dílce vykonávat funkci, pro niž byl navržen. Z tohoto důvodu je snaha defekt eliminovat, nebo s ním při výrobě počítat, aby výsledný tvar obrobku souhlasil s výkresem požadované součásti. Způsoby potlačení defektu jsou uvedeny v kapitole 2.4. („Možnosti zamezení odpružení“).

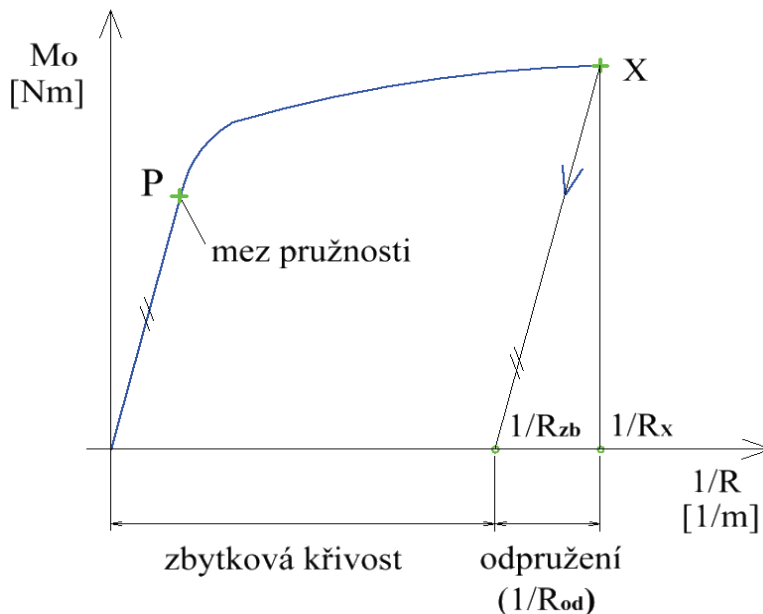
Míra odpružení je závislá na:

- velikosti ohybového momentu „ $M_o$ “,
- tuhosti trubky (se stávající z výchozí tloušťky stěny „ $t_0$ “ a vnějšího průměru trubky v nedeformované části „ $D_0$ “),
- velikosti úhlu otevření „ $\alpha_2$ “ (obr. 1.16),
- velikosti poloměru ohybu k ose ohýbané trubky před odpružením „ $R_{od}$ “ (obr. 1.16),
- mechanických vlastnostech ohýbaného materiálu,
- přesnosti, kalibraci a provozním nastavením stroje.

### 1.4.3 VYHODNOCENÍ [1], [3], [11], [32], [35]

Kontrola měřením zbytkového úhlu ohybu „ $\alpha_3$ “ (obr. 1.16) a následné posouzení, zda úhel odpružení „ $\Delta\alpha$ “ (obr. 1.14) leží v přípustných mezích se děje až po ohybu. Avšak předpokládanou velikost defektu je možno určit graficky i analyticky ještě před samotným tvářením.

Na obr. 1.15 je graficky znázorněno odpružení dílce trubky jako závislost ohybového momentu „ $M_o$ “ na křivosti „ $1/R$ “. Stav, ve kterém se trubka nachází po ohybu před odpružením je reprezentován bodem „ $X$ “. Z grafu lze odečíst velikost křivosti před odpružením „ $1/R_x$ “ (převrácená hodnota poloměru ohybu k ose ohýbané trubky v bodě  $X$  „ $R_x$ “) a velikost zbytkové křivosti po odpružení „ $1/R_{zb}$ “.



Obr. 1.17 Schematické znázornění odpružení trubky [32]

Velikost zbytkového poloměru ohybu „ $R_{zb}$ “, mající součást po odpružení se dá stanovit i výpočtem. V literatuře [3] jsou uvedeny vztahy vycházející ze zákona pružného odlehčení plasticky deformovaného tělesa. Jejich úpravou a dosazením lze vyčíslit „ $R_{zb}$ “ jako:

$$R_{zb} = \frac{R_{od}}{1 - \frac{M_o \cdot R_{od}}{E \cdot I}} \quad [\text{mm}] \quad (1.11)$$

S měnícím se poloměrem ohybu „ $R_{od}$ “ je také spojena změna velikosti úhlu ohybu „ $\alpha_4$ “ (obr. 1.14) a s tím souvisejícího odpružení „ $\Delta\alpha$ “ (obr. 1.16). Při jeho výpočtu se vychází z hypotézy tvrdící, že tangenciální délka neutrální osy trubky je před i po odtížení ohybové síly totožná:

$$R_{od} \cdot \alpha_3 = R_{zb} \cdot \alpha_4 \quad (1.12)$$

Dosazením vzorce (1.11) do rovnice (1.12) je výsledkem nevzhledný vztah, z něhož vyjádřené „ $\Delta\alpha$ “ se po úpravě rovná:

$$\Delta\alpha = \alpha_3 - \alpha_4 = \frac{M_o \cdot R_{od}}{E \cdot I} \cdot \alpha_4 \quad [^\circ] \quad (1.13)$$

Po vyčíslení „ $\Delta\alpha$ “ je třeba rozhodnout, zda předpokládaný defekt lze akceptovat. V opačném případě existují metody, kterým je věnována kapitola 2.4 jenž popisuje možnosti jeho redukce. Nicméně konečné rozhodnutí o tom, zda případný defekt eliminovat, bývá v praxi (zejména při sériové výrobě) učiněno po provedení zkušební ohybu. V katalogu firmy CHARVÁT Group s.r.o [11], zabývající se ohybem menších trubek kruhového i čtvercového profilu, je uváděná hodnota odpružení dosahovaných na ohýbačkách do 10 %.

## 2 MOŽNOSTI ELIMINACE DEFEKTŮ [1], [3], [4], [15], [25], [32], [33], [35], [42], [43], [45]

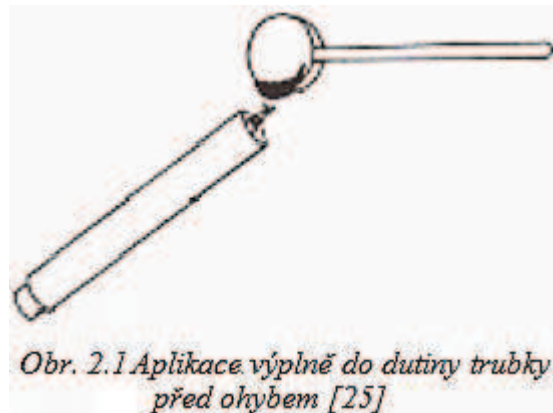
Při dosahování přesných ohybů u trubek je často předpokládána velikost některého z výše uvedených defektů větší, než tolerovaná. Potom je nutné pokusit se zamezit vzniku tohoto nežádoucího jevu, nebo jej alespoň držet v přípustných mezích. Toho lze dosáhnout:

- a) aplikací výplní nebo stabilizačních vložek
- b) ohýbáním s přidavnou tlakovou silou

Ad a) Výplně trubek jsou samostatná sada prvků, jejichž použitím je stabilizován průřez trubky (nejčastěji kruhový, ale i čtvercový a obdélníkový). [32] Vyztužení se děje obsáhnutím dutiny trubky výplní. Používají se jak při ohybu za tepla, tak i za studena, na ručních i strojních ohýbačkách. Jsou rozeznávány různé druhy „plnidel“, a to:

- tuhá, lehko tavitelná
  - sypká
  - tekutá
  - elastická
  - mechanická
- *Tuhé a lehko tavitelné výplně*

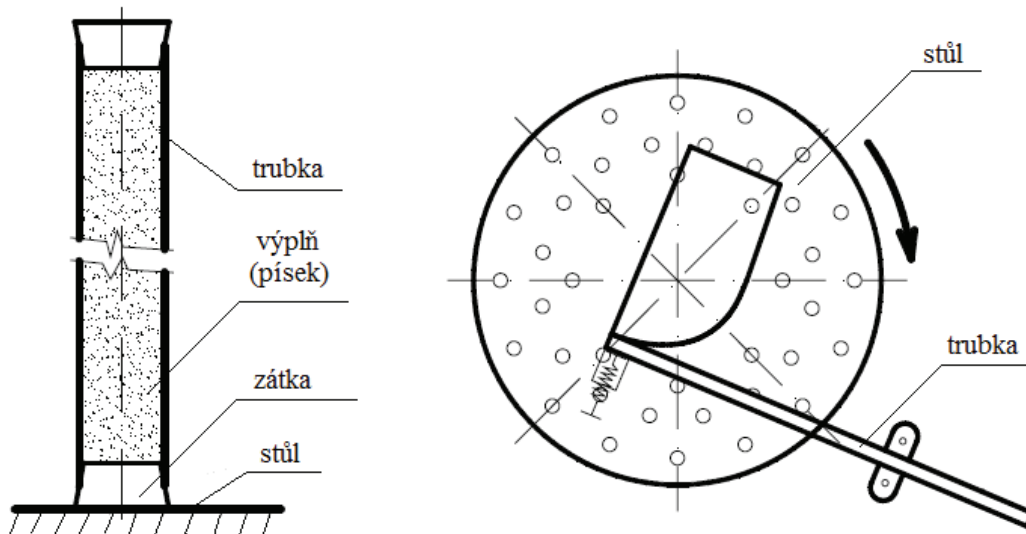
Jejich primární využití je při ohýbání krátkých trubek velikých průměrů a řadí se mezi ně: zmrzlá voda, kalafuna, technická močovina  $\{CO(NH_2)_2\}$ , dusičnan draselný (sanytr)  $\{KNO_3\}$ , nebo dusičnan vápenatý  $\{Ca(NO_3)_2\}$ . Tyto jsou po skončení operace ohybu vypláchnuty z dutiny trubky horkou vodou o teplotě  $(70\div 80)^\circ C$ . Nevýhodou je fakt, že plnidla s klesající teplotou křehnou a s rostoucí křehkostí se zmenšuje stabilita ohýbaného průřezu trubky. Tento problém může být částečně odstraněn použitím lehko tavitelných slitin na bázi bismutu  $\{Bi\}$ , kadmia  $\{Cd\}$ , hydraulicky čistého olova  $\{Pb\}$  a čistého cínu  $\{Sn\}$ . V publikaci [33] je uveden následující postup jejich použití. Slitina ohřátá na teplotu  $80^\circ C$  je nalita do trubky a v ní utěsněna zátkami. Odtud se po zchladnutí a následném ohybu vytaví vřelou vodou ( $90^\circ C$ ). Nevýhodou může být ovlivnění základního materiálu teplotou výplně.



- *Sypké výplně*

Typickým plnidlem je čistý křemičitý písek, bez příměsí vápence a hlíny. Optimální zrnitost je  $2\div 3$  mm. [15] Potřebná hustota písku v dutině na jednom konci zaslepené trubky bývá dosažena ručně, nebo strojně. Distorze ohýbaného profilu je oproti použití lehce tavitelných výplní vyšší, ale vedlejší časy (plnění, zajištění, vyprázdnění) jsou výrazně kratší. Při ohýbání za tepla je z bezpečnostních důvodů požadována suchost plniva. Tlak odpařené vlhkosti působící na konce trubky by mohl vyrazit zátky a zranit obsluhu.

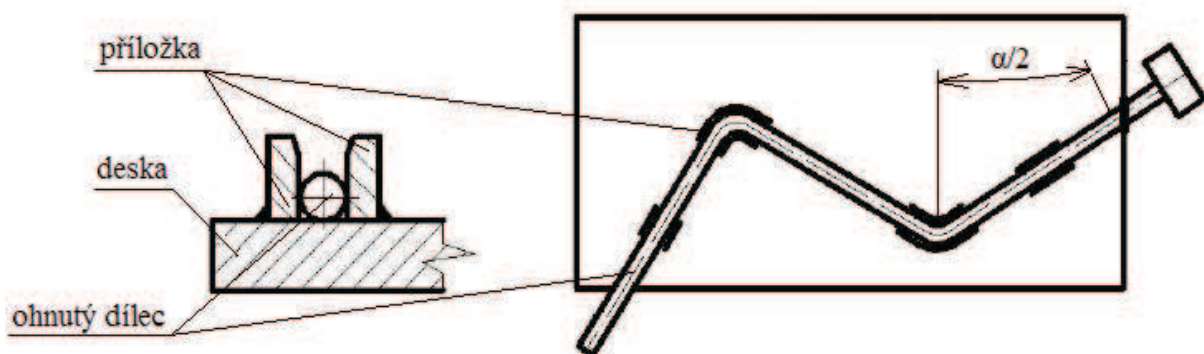
Další možností je využití ocelových kuliček, je zde ale nebezpečí vzniku důlků na vnitřní stěně ohýbané části trubky. Tento druh výplně není doporučen při ohybu obrobků z měkkých kovů (měď, hliník) anebo u potrubí, kde se předpokládá vysokorychlostní tok média (víření → kavitace → lokální podtlak → vydírání stěny). [44]



Obr. 2.2 Schema ohybu trubky s výplní [35]

- *Tekuté výplně*

Jsou nejčastěji užívané při ručním ohýbání dlouhých trubek rozličných průměrů. Patří mezi ně: voda, hydraulické oleje s nízkou viskozitou (AMG-10), jejich směsi, ale také stlačený vzduch. Komprese výplně v dutině trubky (25÷40) MPa je zprostředkována přes plnicí ventil našroubovaný na jednom konci trubky. Druhá strana je zaslepena pojistovacím obdobně upevněným ventilem. Maximální dovolený tlak v tekutině „ $p_{max}$ “ je závislý na vnitřním průměru trubky v nedeformovaném stavu „ $d$ “, tloušťce stěny před ohybem „ $t_0$ “ a smluvní mezí kluzu „ $R_{p0,2}$ “.



Obr. 2.3 Šablona mající tvar ohnuté trubky [35]

Vyhodnocení, zda nedošlo k nadměrnému „nafouknutí“ trubky vlivem přílišné hustoty výplně se děje po ohybu. Kontrolovaný dílec je vložen na stůl mezi dvě příložky kopírující konturu požadované součásti. Při zapadnutí výrobku do připraveného kalibru splňuje součást tvarové požadavky (obr. 2.3), v opačném případě se jedná o zmetek.

- *Elastické výplně*

Jsou to látky vyznačující se velkou pružností, oteřuvzdorností, houževnatostí a vysokou pevností při trhání materiálu. [41] Mezi nejpoužívanější patří polyethylenové polymery (polyetylény) a polyuretanové elastomery (polytany). Typický příklad jejich uplatnění je při ohybu tenkostěnných trubek tlakem. V porovnání s kapalinovými plnidly mají podstatně nižší nároky na těsnění, ale dochází k jejich opotřebení.

- *Mechanické výplně*

Oproti ostatním druhům plnidel se liší svou účelovostí, kdy výplně tuhé, lehko vytavitelné, sypké a tekuté jsou tvořeny látkou nebo směsí látek. Kdežto mechanické výztuhy jsou přípravky vyrobené pro konkrétní rozměry ohýbané součásti. Mohou být sofistikovaně navrženy pro aktuální parametry procesu ohybu, viz kapitola 1. Mechanické výplně se aplikují při ohybu kratších dílců relativně velikých průměrů, [1] jsou jimi např. hustě vinuté pružiny či silonové a kovové vložky (trny). Pro geometricky přesný ohyb je velmi důležité snížení tření na stykových plochách mechanické stabilizační výplně s ohýbanou trubkou mazáním. Obecně nejvhodnější maziva jsou minerální oleje



*Obr. 2.4 Příklad hustě vinuté pružiny využívané při ohybu trubek [35]*

Nejčteněji užívanými mechanickými výztuhami jsou kovové stabilizační trny vyrobené z pochromované oceli či ampca (speciální slitina bronzů). První jmenované jsou vhodné pro hliníkové, měděné nebo ocelové trubky. Pro ohyb trubek z materiálů se speciálními mechanickými vlastnostmi (pevnost, tvrdost, korozivzdornost), jakými jsou titan, nerez a inconel, jsou určeny ampcové trny. [42] Pro kruhový průřez tvářené trubky je uvedena, [32] maximální velikost vůle mezi povrchem dutiny polotovaru a do ní vsunutým trnem, jako 20 % původní tloušťky stěny. Při ohybu nekruhových profilů trubek je limitní vůle kvůli propadu stěn ještě zmenšena.



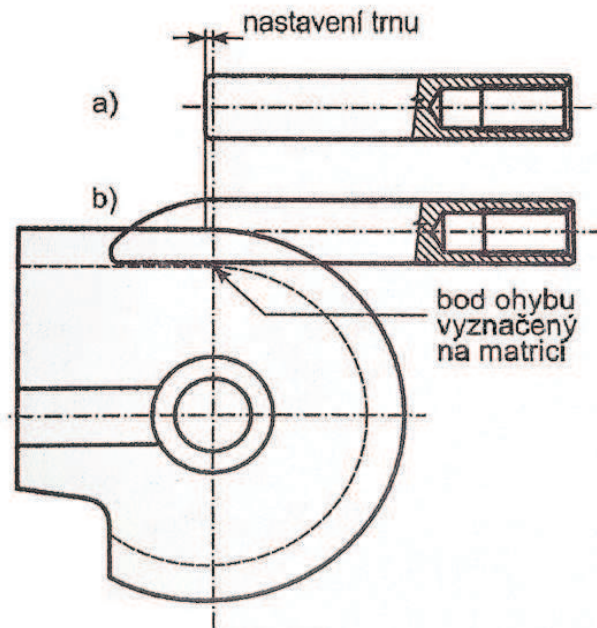
*Obr. 2.5, 2.6 Příklady kovových stabilizačních trnů [43], [42]*

V praxi se používající kovové stabilizační trny mají různé velikosti a tvary. Dělí se do tří základních skupin, a to :

- pevné (kolíkové, formované),
- vrstvené (pružné),
- segmentové (válcové, polokulové a kulové).

- Pevné trny

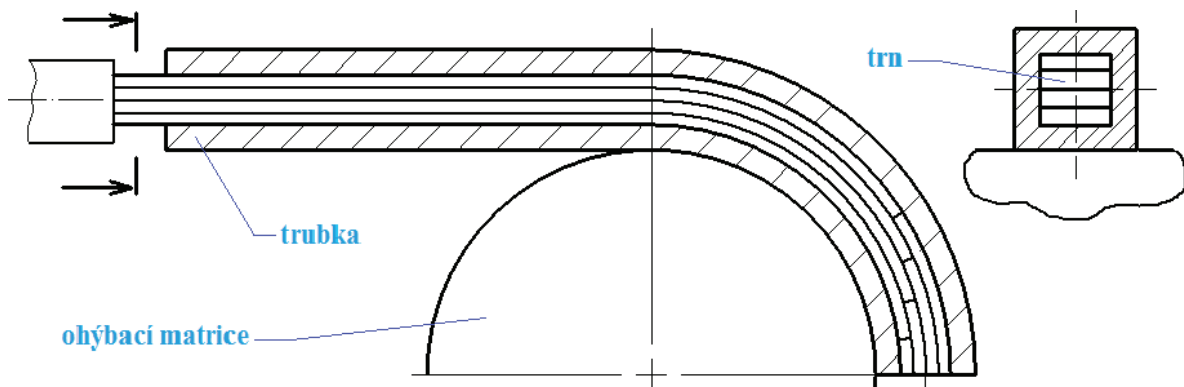
Jedná se o stabilizační výztuhy tvořené jedním dílcem, proto jsou výrobně jednodušší a levnější než trny článkové. Hlavní funkcí kovové výplně během ohybu je ochrana stěny trubky proti zborcení její vnější strany. Používají se převážně při tváření tlustostěnných trubek na větší poloměry ohybu. Podle geometrie je lze dále dělit na kolíkové (obr. 2.7 a) a formované (obr. 2.7 b). Příčměm formovaný trn je zakončen tvarovaným koncem, kterým je přesně kopírován poloměr ohybu, a proto poskytuje během tváření větší oporu uvnitř trubky. [42] Pro správný průběh ohybu je také důležité přesně nastavit vzájemnou polohu trnu a matrice (obr. 2.7). Teoretická vzdálenost k bodu ohybu se vyčte z tabulky vzniklé předchozí praktickou zkušeností, a roste spolu s průměrem tvárené trubky. Příklad takové tabulky je uveden v příloze.



Obr. 2.7 Nastavení pevných stabilizačních trnů při ohybu [1]

- Vrstvené trny

Funkční část přípravku je tvořena vrstvou tenkých, na sebe kladených plátků plechů, které jsou navařeny k tělu trnu. Tento typ trnu je při procesu ohýbání tváren spolu s trubkou, což zajišťuje velkou stabilitu průřezu v místě ohybu, [1] ale zároveň je nutné vyvinout větší ohybový moment „ $M_o$ “ (obr. 1.4). Plechy se vyrábějí válcováním kovových materiálů o vysoké mezi kluzu (proto bývají někdy nazývány pružné trny). Příčměm se zmenšováním poloměru ohybu roste požadavek na elasticitu z důvodu potřebné manipulace trnu v trubce. Proto je při zachování maximální doporučené vůle, nebo menší, nutné mazání.



Obr 2.8 Použití pružného trnu v praxi [3]

Kladením plechů na sebe vznikají profily s ostrými hranami, proto se těchto trnů užívá pro komfortní ohyb trubek čtvercových a obdélníkových průřezů (obr. 2.8).

- Segmentové trny

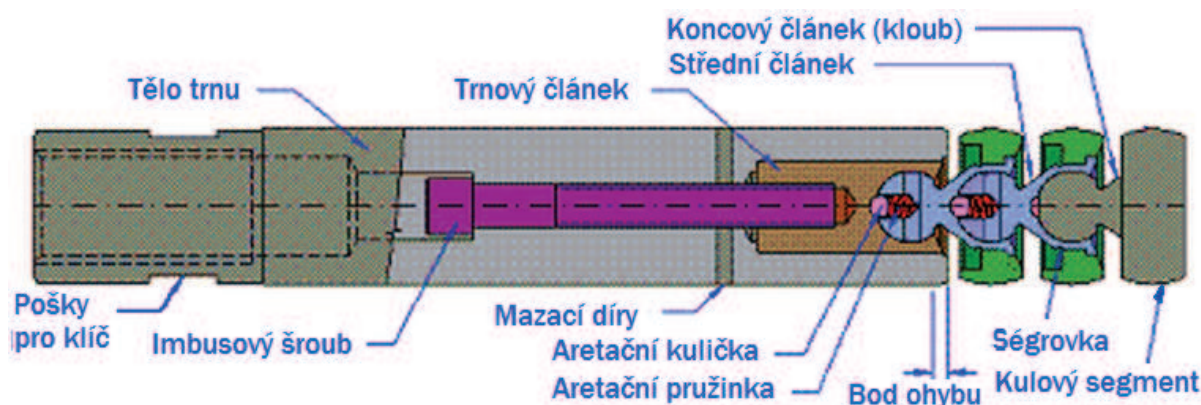
Tyto mechanické stabilizační výplně jsou navrženy tak, aby byl spolu s ohýbaným materiálem trubky také shodně měněn tvar činné části trnu. Tato část je tvořena segmenty, které mohou být navzájem spojeny buď kulovými klouby, články, nebo lankem. [1] Podle velikostí vyráběných segmentů lze tyto přípravky využít při ohybu trubek rozličných velikostí (obr. 2.5, 2.6).



Obr. 2.9, 2.10 Segmentový trn s lankem v celku a v demontovaném stavu [45]

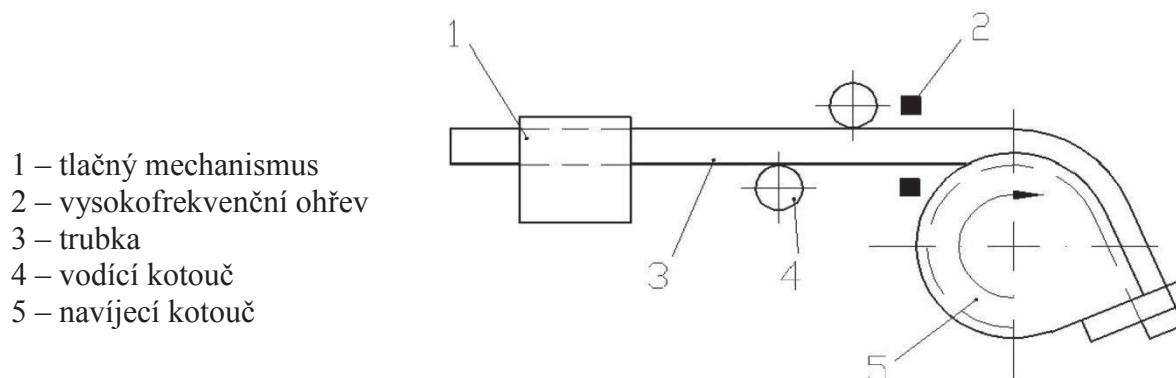
Segmentové trny s kulovými klouby lze volně ohýbat v prostoru, kdežto článkové spoje umožňují ohyb pouze v jedné rovině. Navíc disponují vyšší tuhostí oproti spojení s lankem. Z těchto důvodů jsou v této době segmentové kulové trny nejpoužívanějšími výtuhami ve své kategorii. Dělí se podle využitelnosti do tří skupin:

- *standardní* → Nejčastěji užívaný trn, [42] vyráběný v provedení s jedním, nebo i více segmenty (obr. 2.9). Ze všech tří uvedených je u něj velikost rozteče sousedních segmentů největší, tzn. poskytuje deformovanému profilu trubky nejmenší oporu. Z toho důvodu se využívá při ohybu tužších dílců se silnějšími stěnami.
- *pro tenkostěnné trubky* → Oproti standardnímu trnu jsou segmenty uspořádány těsněji, stěna trubky je tak během ohybu lépe vyztužena. Mají využití při ohybu tenkostěnných trubek.
- *pro velmi tenkostěnné trubky* → Má nejtěsnější uspořádání segmentů, tím pádem i nejvíce bodů dotyku s tvářenou trubkou v místě ohybu. Z tohoto důvodu se využívá pro jemné ohyby trubek nejtěsnějších stěn. Nevýhodou je menší pevnost trnu obětovaná na úkor větší opory [42].



Obr. 2.11 Průřez standardním segmentovým kulovým trnem [42]

Ad b) Ohýbání trubek s přídavnou tlakovou silou je výrobní technologie, zmenšující riziko vzniku trhlin v tahové oblasti materiálu trubky. Bývá zařazena do ohýbacího procesu zejména při tváření dílců na malé (ostré) poloměry ohybu (kdy relativní poloměr ohybu „ $R/D_0$ “ nabývá hodnoty 1,5 a větších). Lze ji provádět s ohřevem tvářeného dílce, nebo bez.



- 1 – tlačný mechanismus
- 2 – vysokofrekvenční ohřev
- 3 – trubka
- 4 – vodící kotouč
- 5 – navíjecí kotouč

Obr. 2.12 Schematické znázornění ohybu s tlakovou silou [15]

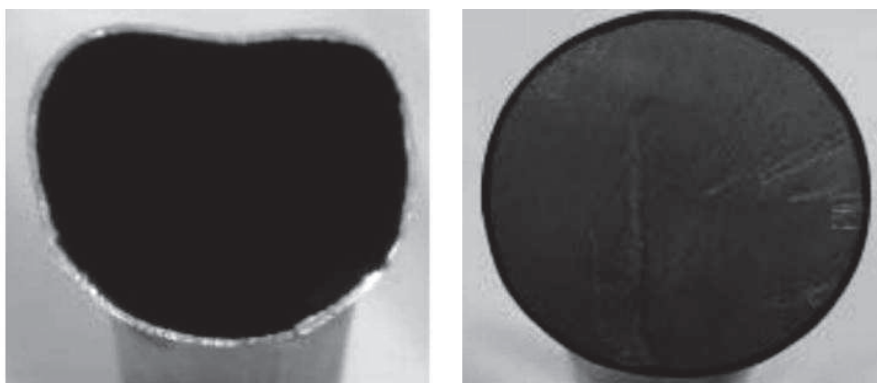
Defekt je nejučinněji eliminován při technologii ohybu s tlakem a vysokofrekvenčním ohřevem, který je uskutečňován v úzce vymezené části obrobku (obr. 2.12). [32] Přídavná tlaková síla zajišťující přísun materiálu do ztenčované tahové oblasti může také způsobit ztrátu stability vnitřní stěny trubky. Velikost použité přídavné tlakové síly je tedy limitována tímto defektem.

## 2.1 REDUKCE ZPLOŠTĚNÍ [32], [46]

Na základě informací uvedených v kapitolách 1.1.1, 1.1.4 je možné určit předpokládané místo dominantního zploštění kruhového průřezu trubky, a po ohybu provést vyhodnocení závažnosti defektu.

Cílem této kapitoly je seznámit se s možnostmi redukování velikosti zkoumaného defektu do přípustných mezí. Během tváření silnostěnných trubek na větší poloměry ohybu, (hladké ohyby) je vznikající ovalita průřezu i bez použití protidefektových opatření zanedbatelná. Jinak je tomu u tenkostěnných dílců ohýbaných na malé poloměry (ostré ohyby), kdy je zploštění kruhového průřezu trubky intenzivní.

První možností jeho redukce, při zachování požadovaného tvaru součásti je volba materiálu polotovaru o vyšší tvárnosti. Další eventualitou je zesílení tloušťky stěny tvářené trubky „ $t_0$ “ v místě ohybu či zmenšení úhlu ohybu „ $\alpha$ “ (oba obr. 1.1). Pokud nelze měnit materiál obrobku, ani parametry procesu ohybu (kap. 1), je možno zplošťování trubek do jisté



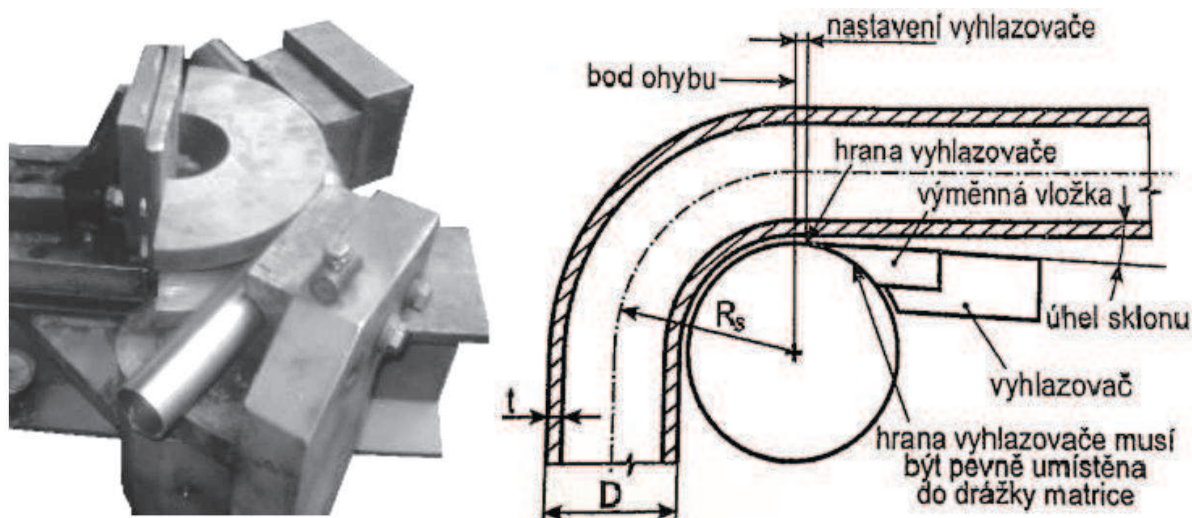
Obr. 2.13 Stav průřezu po ohybu, při použití a nepoužití výplně [46]

míry zamezit použitím výplní nebo stabilizačních vložek (kap. 2 a). Zejména kovové stabilizační trny se hojně využívají pro dosažení kvalitních ohybů. Na obr. 2.13 lze vidět řez trubkou v místě ohybu bez použití plnidla (vlevo) a při aplikaci lehkotavitelné výplně (vpravo).

## 2.2 ZABRÁNĚNÍ ZVLNĚNÍ [1], [46]

Ztráta stability stěny trubky v tlakové oblasti ohybu je defekt, který doprovází ohýbání hlavně tenkostěnných trubek, kruhových i nekruhových průřezů. V kapitole 1.2.1, 1.2.3 jsou popsány příčiny vzniku a možnosti vyhodnocení závažnosti defektu.

Mezi způsoby potlačení míry vznikajícího zvlnění patří například zesílení tloušťky stěny tvářeného dílce „ $t_0$ “ (obr. 1.1). Další možností je redukce velikosti vnitřních tlakových sil „ $F_2$ “ (obr. 1.4). Ta lze dosáhnout zmenšením úhlu ohybu „ $\alpha$ “ (obr. 1.1).



Obr. 2.14, 2.15 Ohyb dílce trubky navíjením s vyhlazovačem [1], [46]

Efektivním, v praxi často používaným způsobem eliminace vln, je ohyb navíjením na strojních ohýbačkách s využitím mechanických výplní a vyhlazovacích lišt. Správné nastavení vyhlazovače při ohybu, pro co nejúčinnější regulaci defektu lze vidět na obr. 2.15 vpravo.

## 2.3 ELIMINACE ZTENČENÍ [1], [35], [46]

Ztenčení je druh defektu postihující nejvýrazněji tenkostěnné ohýbané trubky kruhových i nekruhových průřezů a je podrobně popsán v podkapitolách kapitoly 1.3.

Na základě provedeného experimentu je v literatuře [46] uveden rozdíl velikostí ztenčení tvářeného tenkostěnného dílce zakřiveného o úhel ohybu  $\alpha = 45^\circ$ , s použitím a bez použití výplně. Přičemž u trubky vyplněné slitinou lehkotavitelných kovů bylo detekované ztenčení na vnějším poloměru ohybu o 2 % menší, než při ohybu bez výplně. Z toho je jasné, že během ohýbání trubek běžnými metodami nelze ztenčování stěny účinně zamezit, a to ani aplikací výplní či stabilizačních vložek. [1]

Intenzitu zeslabování vnější stěny tvářené trubky lze ovlivnit změnou parametrů procesu ohybu (podobně, jako v kap. 2.1). Ztenčení při zachování požadovaného tvaru součásti lze efektivně potlačit pouze využitím metod ohybu za současného presování materiálu trubky.

Mezi takové metody se řadí ohýbání s přídatnou tlakovou silou (kap. 2 b), nebo ohyb tlakem s využitím elastické výplně (podrobnější informace o této technologii jsou uvedeny v [1]).

Při ohýbání s využitím pevných, ale i segmentových kovových stabilizačních trnů, je velmi důležité správné nastavení polohy trnu vůči matici. V případě špatného ustavení hrozí vznik lokálního vydutí stěny trubky doprovázené ztenčením stěny, které může vést až ke vzniku trhlin. [1] (Doporučené nastavení polohy trnu je uvedeno v příloze.)

## **2.4 ZMENŠENÍ ODPRUŽENÍ [3], [15]**

V praxi nepoužívanějším způsobem, jak se vypořádat s odpružením dílce trubky po ohybu (kap. 1.4) je přetvářet polotovár na úhel, zvětšený o hodnotu úhlu odpružení „ $\Delta\alpha$ “ (obr. 1.16). Následným účinkem pružnosti materiálu dojde k dosažení požadované geometrie součásti.

Technologickým postupem, vedoucím k eliminaci výsledného úhlu odpružení trubky po ohybu „ $\Delta\alpha$ “ (obr. 1.16), je tváření za současného ohřevu. Trubka bývá nahřívána přednostně na vnitřní straně ohybu kyslíko-acetylenovým plamenem. Zbytkovou křivost je možno dále redukovat použitím materiálu o vyšší ohybové tuhosti, nebo zmenšením poloměru ohybu.

### 3 ZÁVĚRY

Bakalářská práce se zabývá procesem ohybu trubek, respektive možnými druhy defektů, které při tomto způsobu tváření nastávají. U každého defektu je vysvětlen princip vzniku, dále pak možné následky při jeho neregulaci a možnosti eliminace do přípustných mezí. Druhá polovina bakalářské práce je pak věnována popisu přípravků a technologie, sloužící k minimalizování defektů. V závěrečné části práce bylo cílem vytvořit pro jednotlivé typy defektů výčet (výše popsanych) možností ("návod"), kterými lze velikost těchto defektů redukovat.

Překvapivým zjištěním byla existence celé škály možností způsobů, jak více či méně úspěšně vznikající defekty eliminovat. Zploštění kruhového průřezu trubky lze regulovat jak použitím stabilizačních vložek, tak mechanických výplní, nebo i změnou geometrie tvářené trubky. Zabránění zvlnění stěny trubky při zachování stávajících parametrů procesu ohybu je nejčastěji dosahováno u ohybu navíjením, na strojních ohýbačkách s využitím mechanických výplní a vyhlazovacích lišt. Pro potlačování defektu, kterým je ztenčení stěny trubky, jsou mechanické výplně a stabilizační vložky při běžných metodách ohybu neefektivní. Pro tento účel se proto využívá metoda ohybu s přídatnou tlakovou silou, nebo ohyb tlakem s využitím elastické výplně. Míra odpružení ohýbaného dílce trubky se nejčastěji redukuje přehnutím trubky na zmenšený poloměr ohybu (odpružení po ohybu → požadovaný tvar).

Nebezpečí vzniku některého z výše uvedených defektů hrozí hlavně při zmenšování poloměru ohybu trubky „ $R$ “, při zvětšování jejího průměru „ $D_0$ “ (skokovou změnou, nebo plynulým přechodem), či za zeslabování tloušťky stěny polotovaru „ $t_0$ “. Tudíž největší důraz na kvalitu ohybu bývá kladen při ohýbání tenkostěnných trubek na malé poloměry ohybu. Vysoce jakostní ohyby jsou požadovány například u součástí instalačních systémů nebo leteckých motorů. Při kusových ohybech na ručních ohýbačkách se používají sypké výplně, kdežto při sériovém ohýbání na strojních ohýbačkách se nejčastěji využívají kovové stabilizační trny. Použití dílců z trubek a jejich následné ohýbání má vzhledem k trendu snižování hmotnosti výrobků velký potenciál i do budoucna.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SAMEK, Radko, Zdeněk LIDMILA a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření. Část II.* Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 155 s. : obr., čb. fot., grafy, tabulky ; 30 cm. ISBN 9788021444065.
2. MACHALA, Martin. *Konstrukce přípravku pro ohýbání dílců z tenkostěnných trubek.* Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2008. 36 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce prof. Ing. Radko Samek, CSc.
3. FIŠAR, Luboš. *Kriteria vzniku defektů při ohybu profilových trubek.* Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011. 65 s. Diplomová práce. Vedoucí práce prof. Ing. Radko Samek, CSc.
4. BARÁNEK, Tomáš. *Tvarování tenkostěnných trubek.* Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011. 28 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
5. Ohýbání trubek pro MINI Cooper. *BOLTJES Group* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.boltjesgroup.cz/projekty-portfolio/ohybani-trubek-pro-mini-cooper/>.
6. Exhaust Cat-Back 49-46402 VW Golf TDI. *Air Intake Store* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.airintakestore.com/afe-exhaust-cat-back-49-46402-vw-golf-tdi.html>.
7. Židle Liberton. *Pallazio* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.palazzio.cz/designove-zidle-od-tonu/>.
8. Tube Bending. *LASER JUNCTION* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.laserjunction.co.za/tube-bending/>.
9. Pipes. *FICEP Group* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.ficepgroup.com/steel-fabrication/pipes>.
10. Forum. *Practical Machinist*. 2013. Dostupné také z: <http://www.practicalmachinist.com/vb/general/double-pipe-bending-defect-270511/>.
11. CHARVÁT CHS. *Katalog, Nabídka ohýbaných trubek* [online]. 2008, 7 s. [cit. 2015-05-19]. Dostupné také z: <http://www.charvat-chs.cz/sortiment/ohybane-trubky->.
12. Pipe or Tube Ovality Calculator: Measuring Minimum OD. *CHICAGO METAL ROLLED PRODUCTS* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.cmrp.com/dompdf/ovalitycalc.php>.
13. Performance *EXHAUST PLUS* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: [http://www.performanceexhaustplus.com/prod\\_images/thumb/FM-MB300\\_th.jpg](http://www.performanceexhaustplus.com/prod_images/thumb/FM-MB300_th.jpg).

14. TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes, machines, tools*. Berlin: Springer, 2006, xii, 405 s. : il., čb. fot., tabulky ; 25 cm. ISBN 3540332162.
15. SOLIL, Petr. *Technologie pro ohýbání tenkostěnné měděné trubky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009. 44 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.
16. Rock. *Slide Engineering* [online]. 2011 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://forum.ih8mud.com/threads/fjnews-rock-slider-build-w-pics.558421>.
17. Ovality Standard [online]. 2005 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=134060>.
18. MAINCOR. *Technologie pokládky kanalizačních potrubí* [online]. 2010 [cit. 2015-05-19]. Dostupné také z: [www.maincor.cz/download.php?id=230](http://www.maincor.cz/download.php?id=230).
19. SVOZIL, Jan. *Optimalizace potrubních tvarovek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012. 29 s. Dostupné také z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/820>. Doktorská práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.
20. Způsob měření ovality trubek [online]. 2013 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/admin/t.py?t=11&i=101259>.
21. Getting Ovality To Work. *Winton MACHINE: Complete Engineered Solutions for Tube and Coax Fabrication* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.wintonmachine.com/getting-ovality-to-work-how-demanding-ovality-requirement-can-impeded-the-flow-of-work>.
22. Univerzální měřidla. *UNIMETRA spol. s.r.o* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: [http://www.unimetra.cz/soubory\\_materialy/67\\_1.pdf](http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/67_1.pdf).
23. ENGINEERS, NPCS Board of Consultants. *The complete technology book on steel and steel products: fasteners, seamless tubes, casting, rolling of flat products* [online]. Delhi, India: NIIR, 2008. 136 s. [cit. 2015-05-19]. ISBN 81-783-3018-0. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=39uZAgAAQBAJ&pg=PT30&lpg=PT30&dq=tube+ovality+coefficient&source=bl&ots=RcpXTI0foK&sig=1XPybArIay\\_OGcLGyj4WBYfbnZM&hl=cs&sa=X&ei=zfVaVbibFoGRsAGI8YHQBg&ved=0CCgQ6AEwAQ#v=onepage&q=tube%20ovality%20coefficient&f=false](https://books.google.cz/books?id=39uZAgAAQBAJ&pg=PT30&lpg=PT30&dq=tube+ovality+coefficient&source=bl&ots=RcpXTI0foK&sig=1XPybArIay_OGcLGyj4WBYfbnZM&hl=cs&sa=X&ei=zfVaVbibFoGRsAGI8YHQBg&ved=0CCgQ6AEwAQ#v=onepage&q=tube%20ovality%20coefficient&f=false).
24. SCHULER, GmbH. *Handbuch der Umformtechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996, 565 s. ISBN 35-406-1099-5.
25. SEMERÁD, Petr. *Rovnění a ohýbání* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: [http://souhustopece.cz.uvirt19.active24.cz/wp-content/uploads/VY\\_32\\_INOVACE\\_07\\_OV\\_E1-%E2%80%93OH%C3%9DB%C3%81N%C3%8D-KOV%C5%AE.pdf](http://souhustopece.cz.uvirt19.active24.cz/wp-content/uploads/VY_32_INOVACE_07_OV_E1-%E2%80%93OH%C3%9DB%C3%81N%C3%8D-KOV%C5%AE.pdf).

26. LIU, Yafei a Daxin E. Effects of Cross-Sectional Ovalization on Springback and Strain Distribution of Circular Tubes Under Bending. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. Boston: Springer US, 2011, 20(9): 1591-1599 [cit. 2015-05-19]. DOI: 10.1007/s11665-010-9813-z. ISSN 10599495.
27. ČERMÁK. *Zjišťování exponentu deformačního zpevnění*. Dostupné také z: [http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMTV/5\\_exp\\_n.pdf](http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMTV/5_exp_n.pdf).
28. Drain Pipe Lining Cornwall. *SOUTH WEST DRAINS: drainage and cctv specialists* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: [http://southwestdrainsltd.co.uk/draains\\_cornwall/show.php?g=8&i=61](http://southwestdrainsltd.co.uk/draains_cornwall/show.php?g=8&i=61).
29. FISHER, Teresa. *Using mandrels for bending tube* [online]. 2002 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/using-mandrels-for-bending-tube>.
30. ZEDNÍČEK, Jan. *Vliv tváření na mechanické vlastnosti materiálu*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Filípek, CSc.
31. Některé druhy poruch: *Únava - základní informace* [online]. In: . [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.reliability.estranky.cz/clanky/nektre-druhy-poruch/nektre-druhy-poruch---cyklicke-zatezovani-konstrukce-az-k-unavovemu-lomu.html>.
32. RICHTER, Tomáš. *Ohýbání trubek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014. 29 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Ladislav Žák, Ph.D.
33. ZOUHAR, Ondřej. *Moderní metody ohýbání trubek a profilů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.
34. MOHINDAR, L., NAYYAR. *Piping Handbook*. 4. doplněné vydání. R. R. Donnelley & Sons Company, 2000. 2483 s. ISBN ISBN 0-07-047106-1.
35. ZACHOVAL, Jan. *Návrh technologie výroby ohýbané součásti a konstrukční řešení nástroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009. 72 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Ladislav Žák, Ph.D.
36. VALLE, Benjamin. *Pipes Tubing & Wiring: Process Control Instrumentation Training* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://benvalle.com/Pipes%20And%20Tubing.html>.
37. ČSN EN 3658. *Letectví a Kosmonautika - Ohyby trubek používaných v motorech - Konstrukční norma*. [s.l.] : [s.n.], 1.10.2008. 12 s.
38. ČSN EN 13 480-4. *Kovová průmyslová potrubí - Část 4: Výroba a montáž – Konstrukční norma*. [s.l.] : [s.n.], 1.11. 2003. 40 s.

39. Měření tloušťky. *TECHNO TEST s.r.o: Nedestruktivní zkoušení materiálů* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: [http://www.technotest.cz/mereni\\_tloustky](http://www.technotest.cz/mereni_tloustky).
40. Plošné tváření [online]. 99 s. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~sbenesov/Skriptatvareni.pdf>.
41. PLASTOR s.r.o. *Vývojář a distributor polyuretanové chemie* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.plastor.cz/c-10-elastomery.html>.
42. OMNI-X CZ s.r.o. *Evropský výrobce nástrojů pro ohýbačky trubek* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.omni-x.cz/cs/cs/c/nastroje-pro-ohybani-trubek/>.
43. ANCORA: Praha [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.ancorapraha.cz/produkty/slitiny-na-bazi-medi-polotovary-albromet/hotove-vyrobky-galerie/>.
44. NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1990, 333 s. : obr., fot., tb. ; 21 cm. ISBN 8003002060.
45. Entech Engineering LTD: *Mandrels* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://entechengineering.co.uk/tooling/mandrels/>.
46. Journal of theoretical and applied mechanic. Varšava, 2014. 7 s. Dostupné také z: <http://www.ptmts.org.pl/jtam/index.php/jtam/article/view/v52n1p227/1819/>.

# SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
$a, l$	Vzdálenost středů dvou sousedních vln	[mm]
$D_{\max}$	Maximální vnější průměr zploštělé trubky	[mm]
$D_{\min}$	Minimální vnější průměr zploštělé trubky	[mm]
$D_0, d_{01}$	Výchozí vnější průměr trubky	[mm]
$D$	Vnitřní průměr trubky v nedeformovaném stavu	[mm]
$d_{02-04}$	Jednotlivé vnější průměry zvlněné trubky	[mm]
$E$	Modul pružnosti materiálu v tahu	[MPa]
$F_{r1,2}$	Radiální síly působící v tlakové a tahové oblasti průřezu trubky	[N]
$F_1$	Vnitřní tahové síly průřezu ohýbané trubky	[N]
$F_2$	Vnitřní tlakové síly průřezu ohýbané trubky	[N]
$h_m$	Střední výška dvou sousedních vln	[mm]
$I$	Kvadratický moment průřezu	[mm <sup>4</sup> ]
$K_o$	Koeficient ovality průřezu	[%]
$K_z$	Koeficient ztenčení stěny	[%]
$l_{\min}$	Nejmenší vzdálenost středů dvou sousedních vln	[mm]
$M_o$	Ohybový moment	[N·m]
$N$	Velikost vlny ve zvlněné oblasti trubky	[mm]
$N_{\max}$	Maximální velikost vlny ve zvlněné oblasti trubky	[mm]
$p_{\max}$	Maximální dovolený tlak	[MPa]
$R$	Poloměr ohybu trubky	[mm]
$R_e$	Mez kluzu materiálu	[mm]
$R_{\min}$	Minimální poloměr ohybu trubky	[mm]
$R_{od}$	Poloměr ohybu vztažený k ose ohýbané trubky před odpružením	[mm]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu materiálu	[MPa]
$R_X$	Poloměr ohybu vztažený k ose ohýbané trubky v bodě X	[mm]
$R_{zb}$	Zbytkový poloměr ohybu vztažený k ose ohýbané trubky	[mm]
$S_{1,2}$	Plocha tahové a tlakové oblasti průřezu trubky	[mm]
$t$	Tloušťka stěny vyšetřovaného místa trubky	[mm]
$t_{\min}$	Minimální přípustná tloušťka stěny	[mm]
$t_0$	Výchozí tloušťka stěny trubky	[mm]
$u$	Nekruhovitost průřezu trubky	[%]
$\alpha, \alpha_4$	Úhel ohybu před odpružením	[°]
$\alpha_1$	Úhel otevření po odpružení	[°]
$\alpha_2$	Úhel otevření před odpružením	[°]
$\alpha_3$	Úhel ohybu po odpružení	[°]
$\Delta\alpha$	Úhel odpružení	[°]
$\sigma_{cr}$	Kritické napětí vzpěrné stability	[MPa]
$\sigma_p$	Střední hodnota napětí průřezu ohýbané trubky	[MPa]
$\Phi$	Průměr trubky	[mm]
ČNI	Český normalizační institut	[-]

# SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK

Označení	Legenda
obr. 1	Příklady využití ohýbaných trubek v praxi
obr. 1.1	Geometrie ohýbaného dílce trubky
obr. 1.2	Ovalita trubek a její měření
obr. 1.3	Geometrie zploštěného průřezu
obr. 1.4	Zatížení vnitřními silami
obr. 1.5	Ovalita potrubí z polyethylenu
obr. 1.6	Ovalita ocelových trubek
obr. 1.7	Průtok zakřiveným potrubím
obr. 1.8, 1.9	Příklady nežádoucího zvlnění
obr. 1.10, 1.11	Geometrie zvlněné stěny trubky na vnitřním poloměru ohybu
obr. 1.12	Charakteristické rozměry zvlnění
obr. 1.13	Zobrazení toku materiálu během ohybu
obr. 1.14, 1.15	Odpružení při ohybu
obr. 1.16	Geometrie ohybu do tvaru U
obr. 1.17	Schematické znázornění odpružení
obr. 2.1	Aplikace výplně do dutiny trubky před ohybem
obr. 2.2	Schema ohybu trubky s výplní
obr. 2.3	Šablona mající tvar ohnuté trubky
obr. 2.4	Příklad hustě vinuté pružiny využívané při ohybu trubek
obr. 2.5, 2.6	Příklady kovových stabilizačních trnů
obr. 2.7	Nastavení pevných stabilizačních trnů při ohybu
obr. 2.8	Použití pružného trnu v praxi
obr. 2.9, 2.10	Segmentový trn s lankem v celku a v demontovaném stavu
obr. 2.11	Průřez standardním segmentovým kulovým trnem
obr. 2.12	Schematické znázornění ohybu s tlakovou silou
obr. 2.13	Stav průřezu po ohybu, při použití a nepoužití výplně
obr. 2.14, 2.15	Ohyb dílce trubky navíjením s vyhlazovačem
tab. 1.1	Dovolené úchytky nepřesností zvlnění