



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OHÝBÁNÍ TRUBEK

TUBE BENDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ RICHTER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LADISLAV ŽÁK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Richter

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Ohýbání trubek

v anglickém jazyce:

Tube bending

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracovat problematiku ohýbání trubek

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je zpracování literární rešerše dané problematiky doplněné vlastními závěry a zpracování látky do elektronické interaktivní podoby.

Seznam odborné literatury:

KŘÍŽ, Václav a Pavel VÁVRA. Strojírenská příručka. 1. vyd. Praha : Scientia, 1998. ISBN 80-7183-054-2. 255 s. (váz.)

DVOŘÁK, M., F. GAJDOŠ a K. NOVOTNÝ. Technologie tváření : plošné a objemové tváření. 4. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2007. ISBN 978-80-214-3425-7. 169 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Žák, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 18.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá teoretickým rozbořem technologie ohýbání trubek kruhových průřezů. V první části jsou rozepsány vzorce pro výpočet procesů odehrávajících se v materiálu polotovaru a vzorce pro upřesnění proveditelnosti dané operace (popřípadě pro zhodnocení defektů). Ve druhé části práce jsou popsány současné technologie používané při ohybu trubek kruhových (i jiných) průřezů.

Klíčová slova

Konvenční technologie, ohýbací stroje, ohybové momenty pro obrábění trubek, ohýbací stroje, technologičnost výroby

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the theoretical analysis technologies of bending circular cross-sections. In the first part are said formulas for the calculation of the processes occurring in the blank material and formulas to refine the viability of the operation (or for the assessment of defects). The second part describes the current technologies used for bending pipes of circular (and other) cross-sections.

Key words

Conventional technologies, bending machines, bending moments for machining of tubes, bending machines, Technological production

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RICHTER, T. *Ohýbání trubek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Žák, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Ohýbání trubek vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

RICHTER Tomáš

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Ladislavu ŽÁKOVI, Ph.D. z VUT v Brně za užitečnou pomoc při vypracování bakalářské práce.

Dále děkuji pracovníkům úseku technologie tváření a technologie obrábění firmy VISTEON-Autopal v Novém Jičíně a své rodině za psychickou pomoc při studiu.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

	str.
ÚVOD	8
1 TEORETICKÝ ROZBOR	9
2 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ	9
2.1 CHARAKTERISTIKA NEUTRÁLNÍ VRSTVY	10
2.2 NAPĚTÍ V TRUBCE A PŘETVOŘENÍ	10
2.3 OHYBOVÉ MOMENTY	11
2.4 KRITÉRIA TECHNOLOGIČNOSTI	14
2.5 STANOVENÍ ROZVINUTÉ DÉLKY POLOTOVARU	16
3 PORUCHY A DEFEKTY VZNIKLÉ PŘI OHYBU	16
3.1 ZTENČENÍ STĚNY TRUBKY	17
3.2 ZVLNĚNÍ STĚNY TRUBKY	17
3.3 ODPRUŽENÍ MATERIÁLU	18
3.4 ZPLOŠTĚNÍ (OVALITA) TRUBKY	19
4 MOŽNOSTI ELIMINACE VZNIKU DEFEKTŮ	20
4.1 VÝPLNĚ TRUBEK	20
4.2 OHYB KOMBINOVANÝ S OSOVOU TLAKOVOU SÍLOU	23
5 TECHNOLOGICKÉ METODY OHÝBÁNÍ TRUBEK	23
6 VÝROBA TRUBEK	27
7 OHÝBACÍ STROJE	27
8 ZÁVĚRY	29

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých zkratk a symbolů
Seznam použitých obrázků a tabulek
Seznam příloh

ÚVOD [1][2][3][4]

Tváření je výrobní proces, kterým docílíme změnu tvaru, nebo vlastností tvářeného materiálu (obrobek, polotovár) za použití sil, které vnášíme do soustavy s vnější pomocí tvářecího stroje a nástroje. Změna tvaru tvářeného materiálu je podmíněna překročením meze kluzu pro tento materiál a vznikem plastických (trvalých) deformací. Souběžně s plastickými deformacemi vznikají při tváření deformace elastické, které po uvolnění vnějších sil působících na tvářený materiál vymizí.

Technologie se dělí na tváření plošné a tváření objemové. Kam daná operace spadá, závisí na směrech, ve kterých je obrobek deformován. Tváření, při němž deformace nastávají ve všech třech směrech souřadného systému, spadá pod tváření objemové. Kdežto tváření, při němž deformace nastávají převážně ve dvou směrech souřadného systému, spadá pod tváření plošné, do této podskupiny spadá i ohýbání.

Trubky a trouby se nacházejí ve skupině profilových dílců s uzavřenou dutinou a jsou využívány v širokém okruhu průmyslu (stavební, dopravní, chemický ...). Trubky nemusí mít jen kruhový profil, jsou využívány i čtyřhranné či šestihhranné trubky.



Obr. č. 1: názorné ukázky využití ohýbání trubek [11]

1 TEORETICKÝ ROZBOR [1][2][3]

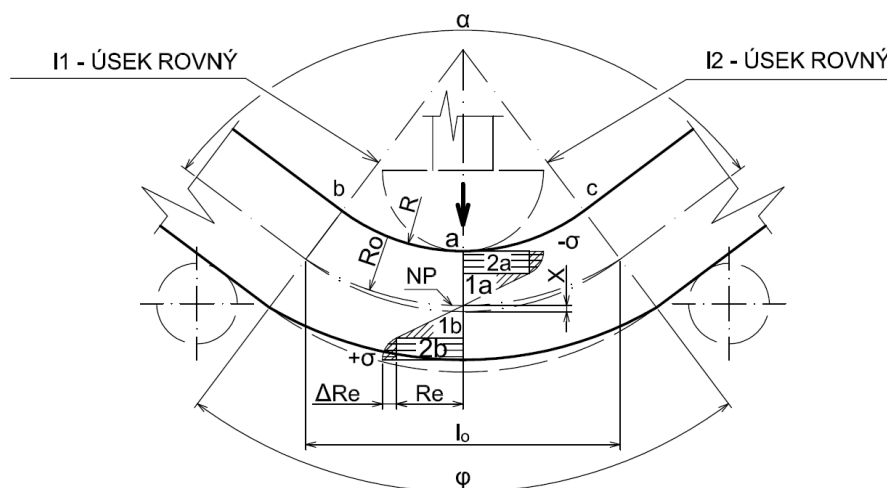
Ohýbání trubek je v dnešní době velmi důležité odvětví u automobilního průmyslu, letectví, klimatizací atd. Ohýbaných trubkových dílů se využívá například pro vedení kapalin a chladicích médií v automobilech. Trend dnešní doby je minimalizace rozměrů a zvyšování efektivity výroby. Jedním z největších problémů při ohýbání trubek je ztenčování stěn tažené části. Nejen díky tomuto jevu lze každý materiál ohnout pouze s omezeným poloměrem ohybu. Tyto nedostatky se snaží vykompenzovat různé světové firmy a vývojová centra vymýšlením nových technologických postupů tváření.

2 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ [1,2,3,5]

Ohyb materiálu se uskutečňuje působením ohybové síly, která se do soustavy vnáší přes obráběcí nástroj. Tato síla vyvolává vnější ohybové momenty M_o , daný moment je zároveň v rovnováze vůči ohybovému momentu vnitřních sil M_{ov} , tedy: $M_o = M_{ov}$.

Ohybový moment ovlivňuje, mimo ohybovou sílu, také systém uspořádání nástroje. Musíme tedy zohlednit použitou technologii ohýbání.

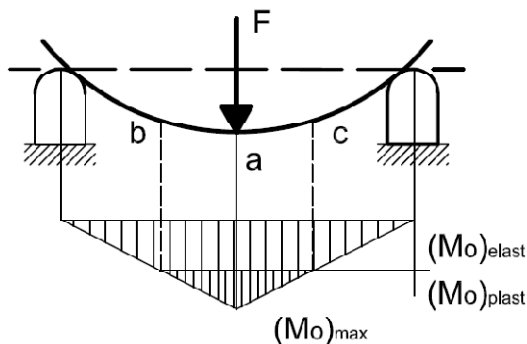
Teorie pro průběh napětí a posunutí neutrální osy při ohybu trubkových součástí se dá pro zjednodušení převést i na problém ohybu nosníku na dvou podpěrách s ohýbací silou působící ve středu viz obr. č.2. V místě ohybu se při procesu ohýbání projevují lokální pružně-plastické deformace. Pružná část po uvolnění vymizí, což vede k odpružení ohybu (teorie popsána kapitole 3.3).



Obr. č. 2: průběh napjatosti v ohýbané součásti na lisu [1][2]

legenda:

- 1a oblast pružné deformace tlakem
- 1b oblast pružné deformace tahem
- 2a oblast plastické deformace tlakem (působí zde deformační zpevnění ΔRe)
- 2b oblast plastické deformace tahem (působí zde deformační zpevnění ΔRe)
- R_o poloměr ohybu neutrální plochy
- R vnitřní poloměr ohybu
- NP neutrální plocha
- $+\sigma$ tahové napětí
- $-\sigma$ tlakové napětí
- a úhel ohybu
- Re mez kluzu materiálu
- X velikost posunutí neutrální plochy (osy) od původní osy průřezu
- l_o délka ohnutého úseku v NP
- φ úhel ohnutého úseku



Obr. č. 3: průběh M_o při ohybu nosníku [2]

Na obr. č. 3 vidíme průběh ohybového momentu, úsek (b ÷ c) uvažujeme za ohnisko deformace. V daném úseku také sledujeme průběh napětí vnášeném do obrobku momentem vnitřních sil " M_{ov} ". V místě označeném písmenem "a" dosahuje ohybový moment maxima.

2.1 CHARAKTERISTIKA NEUTRÁLNÍ VRSTVY

Zatím co u obrázku č.2 (ohyb nosníku) tvoří neutrální vrstvu tzv. "neutrální plocha" při ohýbání trubkových dílů nazýváme tuto vrstvu neutrální osou. V této ose je průběh ohybového napětí konstantní a to " $\sigma_o = 0$ ", stejně tak zůstává konstantní její délka. Na počátku procesu tváření, v nezátíženém stavu, se osa nalézá ve středu průřezu dané trubkové součásti. V průběhu procesu dochází k pěchování materiálu důsledkem zvyšujícího se tlakového napětí na vnitřní straně ohybu, zatím co vnější strana ohybu se důsledkem zvyšujícího se tahového napětí ztenčuje. V důsledku tohoto jevu se neutrální osa posouvá směrem k vnitřnímu poloměru ohybu. Toto posunutí značíme "X" a je závislé na:

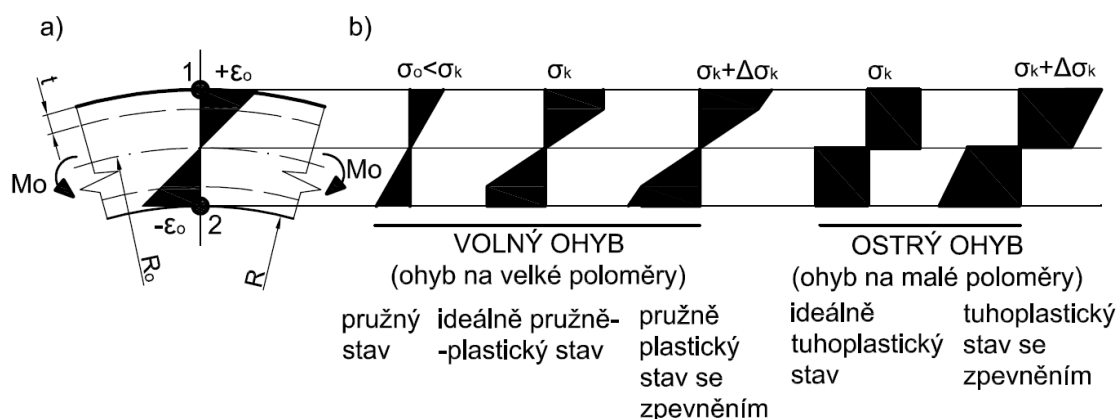
- velikosti poloměru ohybu "R"
- promítá se pouze po délce ohnutého úseku " φ "

Obecně platí že se zmenšujícím se poloměrem ohybu "R", je trubka ohnuta více a zvětšuje se posun neutrální osy "X". Naopak při ohýbání na velké poloměry ohybu ($R/D_0 \geq 6$), kde D_0 značí vnější průměr trubky, dochází ke vzniku malých pružně-plastických deformací přičemž předpokládáme, že neutrální osa se neposouvá a zůstává shodná se střední osou polotovaru. Neutrální osa se využívá zejména pro:

- výpočet délky výchozího polotovaru
- stanovení nového kvadratického momentu při velkých změnách tloušťky stěn

2.2 NAPĚTÍ V TRUBCE A PŘETVOŘENÍ

Jak bylo popsáno v kapitole 2.1, při ohybu trubky se vyvolávají v materiálu různá napětí. V důsledku těchto napětí dochází k přetvoření " ϵ_o ", průběhy napětí a přetvoření jsou názorně označeny na obrázku č. 4 a). Lze vidět, že největší přetvoření nastává v bodě 1 a 2 z obr. č. 4 a). Zatím co v bodě "1" dochází ke ztenčení materiálu (hrozí nebezpečí trhlin při nedodržení kritérií technologičnosti - kapitola 2.4), v bodě "2" dochází k pěchování materiálu a může dojít ke zvlnění materiálu (více v kapitole 3.2). Na obrázku č. 4 b) jsou znázorněny průběhy ohybového napětí " σ_o ". Je zde patrné, že pokud napětí " σ_o " nedosáhne meze kluzu " σ_k ", jedná se pouze o pružný stav materiálu a deformace po uvolnění vymizí. Dalším ohýbáním a zvyšováním napětí " σ_o " se materiál směrem od okrajů k neutrální ose začíná plastizovat. Ohyb zůstane i po uvolnění, část materiálu však stále zůstává v pružném stavu. Platí pro ohyb na velké poloměry ohybu tzv. volný ohyb. Ohyb na malý poloměr ohybu, tzv. ostrý ohyb nastává, pak-li že jsou již všechna vlákna až po neutrální osu zplastizována.



Obr. č. 4: geometrie ohybu trubek [2]

a) průběh osového přetvoření, b) průběh osového napětí

2.3 OHYBOVÉ MOMENTY

Pro stanovení ohybových momentů existuje celá řada postupů. Mezi které patří například:

- metoda stanovení ohybového momentu vnitřních sil s využitím polárních souřadnic, pro malé poloměry ohybu bez uvážení posuvu neutrální osy
- metoda stanovení ohybového momentu vnitřních sil s využitím kartézského souřadnicového systému

Metoda využívající kartézský souřadnicový systém dovoluje zahrnout do výpočtu i vznik defektu ovality (viz. kapitola 3.4). Proto si uvedeme dva typy výpočtů, a to bez a s uvážením vzniku ovality průřezu..

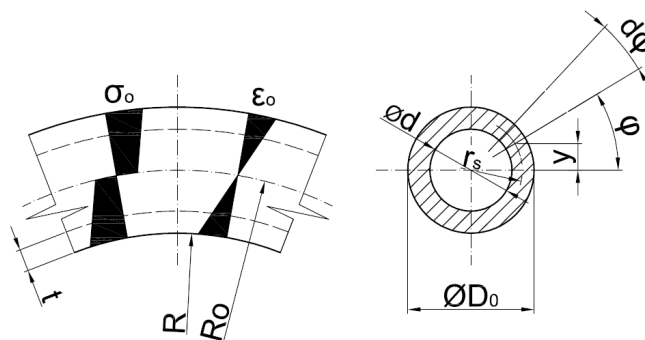
a) metoda s využitím polárních souřadnic

$$M_{ov} = 2 \cdot \int_0^{\pi} \sigma \cdot y \cdot dS [N \cdot m], \quad (2.1)$$

kde pro:

M_{ov}	... ohybový moment vnitřních sil	[N.m]
σ	... vnesená napětí	[Pa]
y	... vzdálenost segmentu dS od neutrální osy	[m]

Přičemž pro aproximaci do polárních souřadnic uvážíme obrázek č. 5.



Obr. č. 5: aproximovaný průběh ohybového napětí a geometrie průřezu trubky [2]

$$y = r_s \cdot \sin \varphi [m], \quad (2.2)$$

kde pro:

r_s	... poloměr k segmentu dS	[m]
φ	... úhel k segmentu dS	[°]

$$dS = r_s \cdot t_0 \cdot d\varphi [m^2], \quad (2.3)$$

kde pro:

t_0	... tloušťka stěny trubky	[m]
-------	---------------------------	-----

$$\varepsilon_y = \frac{y}{R_0} [-], \quad (2.4)$$

kde pro:

ε	... přetvoření materiálu v ose y	[-]
R_0	... poloměr ohybu k ose trubky	[m]

$$d_s = 2 \cdot r_s [m], \quad (2.5)$$

Při uvažování tenkostěnné trubky můžeme volit jako d_s vnější průměr D .

$$\sigma = \sigma_k + \bar{D} \cdot \varepsilon [Pa], \quad (2.6)$$

kde pro:

$$\begin{array}{ll} \sigma_k & \dots \text{ mez kluzu} & [Pa] \\ \bar{D} & \dots \text{ modul zpevnění materiálu} & [Pa] \end{array}$$

Dané vztahy můžeme dosadit do rovnice 2.1, a dále pak integrovat pro výpočet ohybového momentu vnitřních sil:

$$M_{ov} = \sigma_k \cdot d_s^2 \cdot t_0 + \frac{\bar{D} \cdot d_s^3 \cdot t_0 \cdot \pi}{8 \cdot R_o} [N \cdot m], \quad (2.7)$$

Pokud se zanedbá zpevnění materiálu, tedy modul zpevnění materiálu je roven konstantě $\bar{D} = 0$, pak je výsledný vztah pro ohybový moment vnitřních sil roven:

$$M_{ov} = \sigma_k \cdot d_s^3 \cdot t_0 [N \cdot m], \quad (2.8)$$

b) metoda s využitím kartézského souřadného systému

- pro ohyb neuvažující vznik ovality:

Výsledný obrobek uvažujeme v průřezu místa maximálního ohybu kruhový. Vycházíme ze vztahu pro výpočet ohybového momentu:

$$M_{ov} = 2 \cdot \int_0^r y \cdot \sigma \cdot B_{(y)} \cdot dy [N \cdot m], \quad (2.9)$$

kde pro:

$$B_y \quad \dots \text{ šířka průřezu trubky ve vzdálenosti } y \quad [m]$$

σ je skutečné napětí v obrobku dané vztahem:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^n = C \cdot \left(\frac{y}{R_o} \right)^n [Pa], \quad (2.10)$$

Kde pro konstanty C (K) a n platí pro některé materiály tabulka č. 1:

Tab. č. 1: tabulka hodnot n a K "v našem případě C " pro úzký soubor materiálů [6]

materiál	n	K	
		Mpa	psi
nízkouhliková ocel (popouštěná)	0,23	530,00	77,00
litá ocel (typ 4340, popouštěná)	0,15	640,00	93,00
nerezová ocel (typ 304, popouštěná)	0,45	1275,00	185,00
hliník (popouštěný)	0,20	180,00	26,00
hliník litý (typ 2024, tepelně upravený)	0,16	690,00	100,00
měď (popouštěná)	0,54	315,00	46,00
mosaz (70Cu - 30Zn, popouštěná)	0,49	895,00	130,00

Stanovení šířky průřezu "B_y" trubky ve vzdálenosti y od neutrální osy:

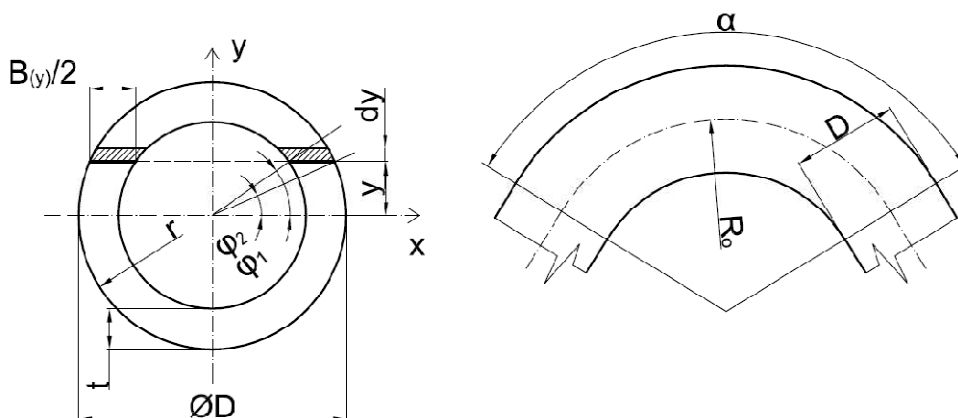
pro $y < r - t$

$$B_{(y)} = 2 \cdot \left[\sqrt{r^2 - y^2} - \sqrt{(r-t)^2 - y^2} \right] [m], \quad (2.11)$$

➤ pro $r - t < y < r$

$$B_{(y)} = 2 \cdot \sqrt{r^2 - y^2} [m], \quad (2.12)$$

Pokud vztahy 2.10, 2.11 a 2.12 dosadíme do vztahu 2.9 dostaneme vztah:



Obr. č. 6: geometrie nezdeformovaného průřezu ohnuté trubky [2]

$$M_{ov} = 2 \cdot \left\{ \int_0^{r-t} y \cdot C \cdot \left(\frac{y}{R_o} \right)^n \cdot 2 \cdot \left[\sqrt{r^2 - y^2} - \sqrt{(r-t)^2 - y^2} \right] \cdot dy + \int_{r-t}^r y \cdot C \cdot \left(\frac{y}{R_o} \right)^n \cdot 2 \cdot \sqrt{r^2 - y^2} \cdot dy \right\} [N \cdot m], \quad (2.13)$$

- pro ohyb trubky uvažující vznik ovality:

Pokud ovalita průřezu není velká, můžeme tvar a rozměry zdeformovaného průřezu zidealizovat a považovat je za neměnné po celé délce průřezu. Vnější i vnitřní křivku trubky tvoří při vzniku ovality elipsy. Integrujeme podle kartézského souřadnicového systému, obdobně jako u příkladu bez vzniku ovality - nebudeme uvádět obrázek pro zdeformovaný tvar. Jako rovnici vnější křivky průřezu bereme:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 [m], \quad (2.14)$$

kde pro:

a	...	hlavní poloosa elipsy	[m]
b	...	vedlejší poloosa elipsy	[m]

Jako rovnici vnitřní křivky průřezu bereme:

$$\frac{x^2}{(a-t)^2} + \frac{y^2}{(b-t)^2} = 1 [m], \quad (2.15)$$

Stanovení šířky průřezu "B_y" trubky ve vzdálenosti y od neutrální osy:

➤ pro $y < b - t$

$$B_{(y)} = 2 \cdot \left[a \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} - (a - t) \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{(b - t)^2}} \right] [m], \quad (2.16)$$

➤ pro $b - t < y < r$

$$B_{(y)} = 2 \cdot a \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} [m], \quad (2.17)$$

Pokud vztahy 2.10, 2.16 a 2.17 dosadíme do vztahu 2.9 dostaneme vztah:

$$M_{ov} = 2 \cdot \left\{ \int_0^{b-t} y \cdot C \cdot \left(\frac{y}{R_o} \right)^n \cdot 2 \cdot \left[a \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} - (a - t) \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{(b - t)^2}} \right] \cdot dy + \right. \\ \left. + \int_{b-t}^b y \cdot C \cdot \left(\frac{y}{R_o} \right)^n \cdot 2 \cdot a \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} \cdot dy \right\} [N \cdot m], \quad (2.18)$$

2.4 KRITÉRIA TECHNOLOGIČNOSTI

Pomocí kritérií technologičnosti jsme schopni posoudit stupeň obtížnosti ohýbacího procesu a možnost dosažení požadované kvality ohybu. Do těchto kritérií spadají:

relativní tloušťka stěny

Dle tohoto kritéria lze rozdělit trubky do dvou kategorií a to:

- tenkostěnné - pakliže platí:

$$\frac{t_0}{D_0} \leq 0,1 \quad (2.19)$$

- tlustostěnné - pakliže platí:

$$\frac{t_0}{D_0} > 0,1 \quad (2.20)$$

relativní poloměr ohybu

Dle tohoto kritéria lze rozdělit druh ohybu trubky do dvou kategorií a to:

- ohyb na malé poloměry (ostrý ohyb):

$$\frac{R}{D_0} \leq 6 \quad (2.21)$$

- ohyb na velké poloměry (volný ohyb):

$$\frac{R}{D_0} > 6 \quad (2.22)$$

stupeň obtížnosti procesu ohybu

Tento parametr zohledňuje oba předešlé vztahy (relativní tloušťku stěny i relativní poloměr ohybu). Znázorňuje nám možnost vzniku defektů dle tabulky č.2.

Tab. č.2: stupeň obtížnosti procesu ohybu [1]

$t_0/D_0 \geq 0,1$	$R/D_0 \geq (2,5 \div 3)$	optimální podmínky procesu
$t_0/D_0 = 0,075$	$R/D_0 = 2,5$	přijatelné podmínky procesu
$t_0/D_0 \leq 0,05$	$R/D_0 \leq 2,5$	nevhodné podmínky procesu

minimální poloměr ohybu

Při ohýbání součástí je stěžejní poloměr ohybu R . Při použití různých technologií a pro různé materiály, je možno dosáhnout rozdílných poloměrů ohybu. Zároveň jsme omezeni minimálním poloměrem ohybu R_{\min} , který není možné překročit z důvodu možného porušení materiálu (především na vnější, tažené straně ohybu).

Minimální poloměr ohybu je ovlivňován mnoha faktory. Jedny z nejdůležitějších parametrů pro jeho stanovení jsou například plasticita, anizotropie, jakost povrchu obrobku, rozměry obrobku (šířka), uspořádání vláken v obrobku (ohýbání podél vláken, a nebo vhodnější ohýbání napříč vlákny). Závisí však také na technologii ohýbání a úhlu ohybu. Uspořádání vláken v obrobku je ovlivněno způsobem výroby polotovaru (např. směr válcování plechu). Při ohybu trubek je velmi důležité klást důraz na způsob výroby trubky. Pro zajištění zachování tvaru trubky po ohybu se využívají také výplně trubek, které nám kompenzují nesplnění požadavků technologičnosti výroby aby mohl být ohyb uskutečněn, nebo zlepšují kvalitu ohybu (více kapitola č. 4.1). Při výpočtu je uvažováno přípustné ztenčení stěn trubek."

Vzorec pro výpočet minimálního poloměru ohybu:

$$R_{\min} = \frac{K \cdot D \cdot (2 \cdot t - t_0)}{2 \cdot (t_0 - t)} [m], \quad (2.23)$$

kde pro:

R_{\min}	...	minimální poloměr ohybu	[m]
K	...	součinitel úhlu ohybu	[-]
D	...	vnější průměr trubky	[m]
t	...	přípustná tloušťka stěny trubky	[m]

Pro stanovení součinitele úhlu ohybu se využívá hodnot z tabulky č.3.

Tab. č.3: stanovení součinitele K úhlu ohybu [2]

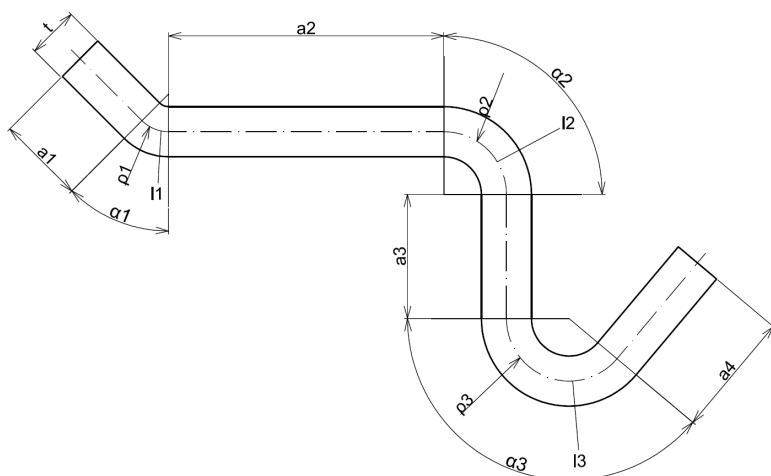
t_0 [mm]	D [mm]	α [°]				
		30	60	90	120	180
K [-]						
1,0	26 - 32	2,58	2,60	2,60	2,65	2,65
1,0	33 - 45	2,89	2,93	2,93	3,39	3,82
1,5	33 - 45	1,99	2,02	2,02	2,44	2,44

Druhou mezí je poloměr ohybu R_{\max} , pokud není dosaženo této hodnoty, pak v materiálu vznikne pouze elastická deformace, která má po uvolnění snahu takzvaně "odpružit" materiál do původního stavu.

Reálný poloměr ohybu tedy musí splňovat podmínku: $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$. Pokud daná podmínka není splněna, mohou vzniknout některé poruchy, které jsou popsány v kapitole 3.

2.5 STANOVENÍ ROZVINUTÉ DÉLKY POLOTOVARU

Rozvinutá délka polotovaru je určena sumou délek veškerých rovných částí a ohýbaných částí, u nichž se počítá s neutrálními vrstvami. Její výpočet je důležitý pro stanovení správné délky polotovaru, který vstupuje do tvářecího procesu.



Obr. č. 7: schéma ohýbaného výrobku [1]

Pokud je polotovar příliš krátký, nelze daný výrobek zhotovit. Na druhé straně dlouhý polotovar dává vzniknout většímu odpadu a přibývají dokončovací operace, které zaručí rozměrové přesnosti (nižší produktivita, vyšší ekonomická nákladovost).

Vzorec pro výpočet délky neutrální plochy:

$$l_i = \frac{\pi \cdot \alpha_i \cdot R_i}{180} [m], \quad (2.24)$$

kde pro:

l_i	... délka neutrální plochy	[m]
α_i	... úhel ohybu	[°]
R_i	... poloměr neutrální osy	[m]

Vzorec pro výpočet rozvinuté délky polotovaru:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{j=1}^m a_j [m], \quad (2.25)$$

kde pro:

L	... rozvinutá délka polotovaru	[m]
a_j	... délka rovné části	[m]

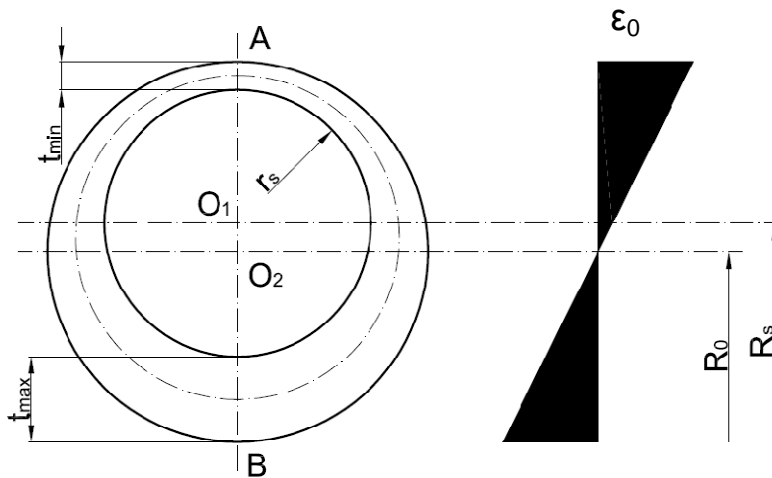
3 PORUCHY A DEFEKTY VZNIKLÉ PŘI OHYBU [1][2][7]

Defekty nastávají z pravidla při nedodržení kritérií technologičnosti, popřípadě z náhodných důvodů, jako je například vnitřní vada polotovaru apod. Mezi defekty a poruchy vznikající při ohybu spadá:

- ztenčení stěny trubky na vnějším poloměru ohybu
- zvlnění stěny trubky na vnitřním poloměru ohybu
- odpružení trubky po dokončení procesu tváření
- vznik ovality (zploštění) trubky

3.1 ZTENČENÍ STĚNY TRUBKY

Jak vyplývá z předešlé teorie, na vnější straně ohybu vzniká tahové napětí, které vede ke ztenčování tloušťky stěny, či dokonce až ke vzniku trhlin. Ztenčování se dá jen velmi obtížně potlačit. Lze jej však omezit a to volbou správné technologie, nebo i případným využitím výplně. Jedna z možností snížení efektu ztenčení je metoda ohybu za současného tlaku. V krajních případech ohýbání na hranici technologičnosti, nebo za ní, může tahové napětí na vnější straně trubky dosáhnout až meze pevnosti, tím se vyčerpá plasticita materiálu a vznikají trhliny.



Obr. č.8: schéma přesunu materiálu v místě ohybu [2]

Ztenčení však není sledováno pouze z důvodu možného vzniku trhlin jako krajní možnosti daného defektu. V mnohých odvětvích se trubky používají pro přenos médií o vysokém tlaku (například instalační systémy mají povolenou maximální hranici ztenčení o 25%). Pro výpočet ztenčení stěny trubky využíváme vztah:

$$(t)_{\min} = t_0 \cdot \left(1 - \frac{D_0 - t_0}{2 \cdot R_0} \right) [m], \quad (3.1)$$

kde pro:

$$t_{\min} \quad \dots \quad \text{ztenčení trubky} \quad [m]$$

"Platí že čím větší vnější průměr trubky "D₀", případně čím menší poloměr ohybu k neutrální ose "R₀", tím větší ztenčení trubky."

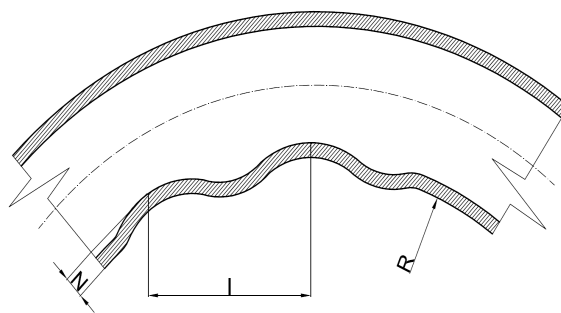
3.2 ZVLNĚNÍ STĚNY TRUBKY

Zvlnění trubky nastává na vnitřní straně ohybu. Má jej za následek tlakové napětí (zpěchování) v materiálu obrobku v místě ohybu. Následuje ztráta stability v místě ohybu a dochází ke zvlnění trubky. Tento jev je velice nežádoucí v provozech, které vyvíjí na daný ohyb vysoké nároky na vibrace či změny tlaků. Často dochází k únavovým porušením v místě zvlnění. Jako u většiny defektů a poruch při ohybu trubek se dá i zvlnění částečně zamezit, popřípadě zcela vyloučit použitím výplně nebo změnou technologie ohýbání.

V podnikových normách se pak povoluje limitní počet vln v závislosti na funkci daného dílce. Normami jsou upravovány i rozteče a výšky vln. Názorně jsou tyto normy zobrazeny v tabulce č.4.

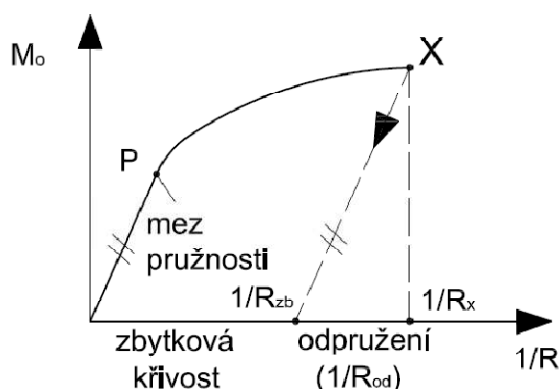
Tab. č.4: dovolené úchytky nepřesností zvlnění [2]

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



Obr. č.9: znázornění geometrie zvlnění trubky [2]

3.3 ODPRUŽENÍ MATERIÁLU



Obr. č.10: schematické znázornění odpružení trubky [2]

Odpružení ohýbané součásti je dáno vnesenými pružnými deformacemi při tváření. Po uvolnění deformačního zatížení tyto pružné deformace vymizí, obrobek tedy nikdy nekopíruje přesný tvar nástroje. Pružné (elastické) deformace jsou pro každý daný materiál rozdílné. Pro ohyb je zejména důležitá mez kluzu materiálu a modul pružnosti v tahu. Zbytkový poloměr (R_{zb}) či zbytková křivost ($1/R_{zb}$) jsou hodnoty, které si daná součást zachovává i po uvolnění ohybového momentu M_o , tedy po uvolnění pružných deformací. Tyto hodnoty především závisí na:

- hodnotě ohybového momentu
- tuhosti dílce
- poloměru ohybu vztaženého k ose trubky (R_o)
- úhlu ohybu (α)

Zbytkovou křivost a odpružení ($1/R_{od}$) lze odvodit z grafu M_o v závislosti na $1/R$ (obr. č.10). Z tohoto grafu je možno dané hodnoty ($1/R_{zb}$ a $1/R_{od}$) určit pomocí Hookova zákona, přímka vedená z bodu X (konec namáhání) rovnoběžně s úsečkou pružné deformace.

Vzorec pro výpočet zbytkového poloměru:

$$R_{zb} = \frac{R_o}{1 - \frac{M_o \cdot R_o}{E \cdot J}} [m], \quad (3.2)$$

kde pro:

R_{zb}	... zbytkový poloměr ohybu	[m]
E	... modul pružnosti obrobku v tahu	[Pa]
J	... kvadratický moment průřezu	[m ⁴]

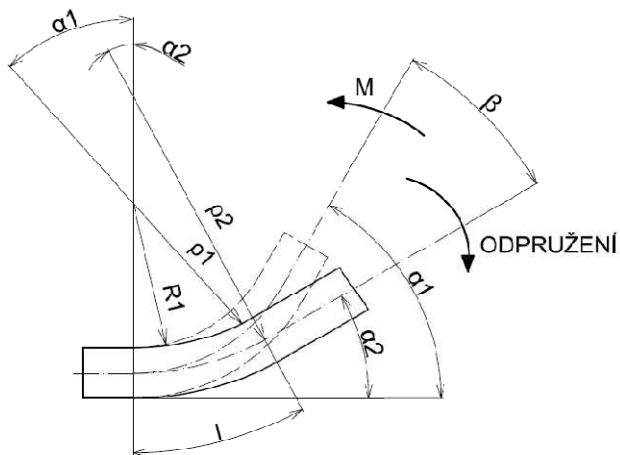
Odpružení se poté počítá za použití předpokladu o zachování délky neutrálního vlákna po odpružení.

Vzorec pro výpočet odpružení trubky:

$$\Delta\alpha = \beta - \alpha_{zb} = \alpha \cdot \frac{M \cdot R_o}{E \cdot J} [^\circ] \quad (3.3)$$

kde pro:

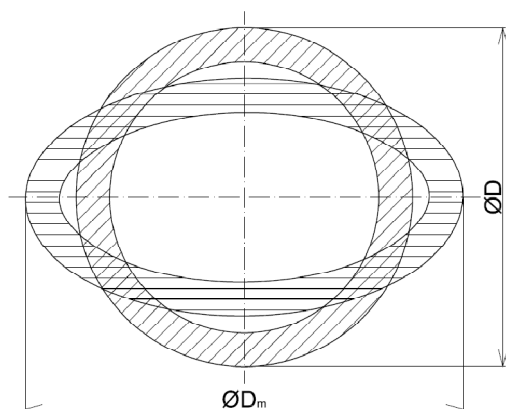
$\Delta\alpha, \beta$... úhel odpružení [°]
 α_{zb} ... zbytkový úhel ohybu [°]



Obr. č. 11: schéma odpružení materiálu [1]

Úhel odpružení se dá technologicky potlačit mnoha způsoby. Jestliže je nástroj používán jednoúčelově pro jeden materiál, lze jej již při konstrukci navrhnout s korekcí, aby se automaticky prováděl ohyb navýšený o daný úhel odpružení. Další možností je kalibrace. Na konci ohýbacího procesu je vyvinuta vyšší ohýbová síla, díky které se v materiálu evokuje místní plastická deformace v místě ohybu. Odpružení se koriguje nebo úplně vymizí.

3.4 ZPLOŠTĚNÍ (OVALITA) TRUBKY



Obr. č. 12: schéma zploštění [1]

Zploštění trubky je další z nežádoucích jevů při ohýbání trubek. Míra zploštění roste společně s třením mezi nástrojem a obrobkem, rostoucí velikostí úhlu ohybu, klesajícím poloměrem ohybu a menší tvárností materiálu obrobku. Zploštění hodnotíme pomocí koeficientu ovality. Tato deformace nepříznivě působí na charakter proudění média a projevuje se negativně i při změnách provozních tlaků. Zploštění lze omezit využitím výplní trubky.

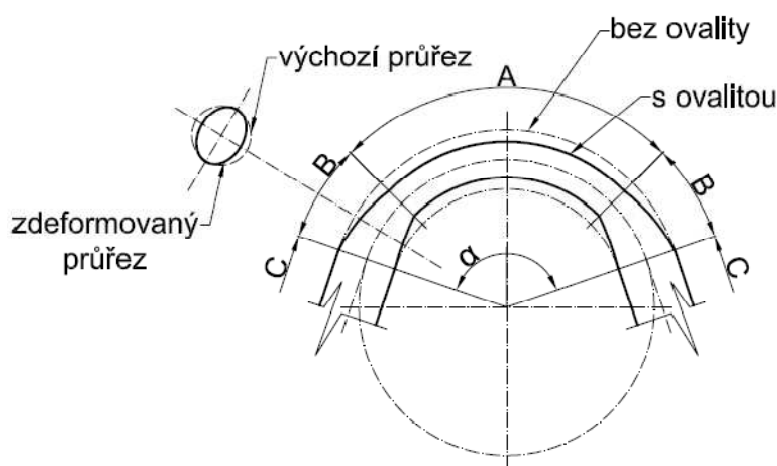
Vzorec pro výpočet koeficientu ovality:

$$K_0 = \frac{D_m - D}{D} \cdot 100 [\%], \quad (3.4)$$

kde pro:

K_0 ... ovalita trubky [%]
 D_m ... průměr trubky ve směru zploštění [m]

Ovalita se neprojevuje po celém úhlu ohnutého úseku " α " stejně. Dělíme ji na tři oblasti znázorněné na obr. č. 13.:



A - oblast rovnoměrné ovality (ORO)

B - oblast nerovnoměrné ovality (ONO)

C - nezdeformovaná část.

Příčemž oblast ONO je brána jako směrodatná a proto vnitřní poloměr ohybu v této oblasti uvažujeme jako poloměr ohybu daného dílce.

Obr. č. 13: schematické znázornění ohnuté trubky s proměnlivou ovalitou [2]

4 MOŽNOSTI ELIMINACE VZNIKU DEFEKTŮ [1][2][7][8]

Pokud chceme vyrábět kvalitnější výrobky ohýbáním trubkových profilů, musíme předcházet vzniku defektů popsaných v kapitole 3. Proto využíváme:

- výplně nebo stabilizační vložky (ruční i strojní ohyb)
- ohýbání s přídatnou tlakovou osovou silou (strojní ohyb)

4.1 VÝPLNĚ TRUBEK

Výplně trubek jsou samostatná sada prvků, jejichž použitím je stabilizován kruhový průřez trubky a současně se zabraňuje vzniku defektů. Výplně se v praktickém strojírenství využívají, pohybujeme-li se v jiných, nežli optimálních podmínkách poměrných rozměrů (viz. tabulka č. 2 v kapitole 2.4). Za těchto okolností se používají výplně druhů:

- tuhé
- lehko tavitelné
- tekuté
- elastické
- sypké
- mechanické

tuhé a lehko tavitelné výplně

Jejich primární využití je při ohybu krátkých obrobků většího průměru. Jako základní prvky pro tuhé výplně se využívá kalafuna, zmrzlá voda, dusičnan vápenatý $\{Ca(NO_3)_2\}$, dusičnan draselný (ledek) $\{KNO_3\}$, technická močovina $\{CO(NH_2)_2\}$. Tyto druhy tuhých výplní lze po dokončení ohýbání vypláchnout horkou vodou o teplotě $(70 \div 80^\circ C)$. Velkou nevýhodou je křehnutí materiálu vlivem nízkých teplot při procesu ohýbání. Tento jev potlačuje další kategorie tuhých výplní, kterou tvoří lehce tavitelné slitiny na základě bismutu $\{Bi\}$, kadmia $\{Cd\}$, čistého cínu $\{Sn\}$ a hydraulického měkkého olova $\{Pb\}$. Daná slitina je natavená na teplotu $80^\circ C$. Výplach se provádí horkou vodou $(90^\circ C)$.

tekuté výplně

Tento druh výplně je vhodný pro ohyb dlouhých obrobků a při ručním ohybu. Jako výplň je využíván hydraulický olej (AMG-10). Trubka musí být na obou koncích zaslepena koncovkami s maticemi, které slouží pro upnutí plícního ventilu a pojišťovacího ventilu v kombinaci s akumulátorem. Tlak kapaliny je pro různé rozměrové a materiálové charakteristiky (průměr, tloušťka stěny, mez kluzu) rozdílný, zpravidla se však pohybuje v rozmezí (25 ÷ 40 MPa). Nevýhodou použití tekutého plniva je nutnost kontroly v šabloně po ukončení procesu ohýbání. Jestliže se trubka vlivem tlaku výplně zdeformuje (nafoukne), nezapadne do šablony a je označena za nevhodný výrobek. Maximální přípustnou hodnotu tlaku tekuté výplně lze zkontrolovat dle vztahu:

$$p_{\max} = R_{p0,2} \cdot \frac{\frac{d}{t_0} + 1}{0,5 \cdot \left(\frac{d}{t_0}\right)^2 + \frac{d}{t_0} + 1} [\text{Pa}], \quad (4.1)$$

kde pro:

p_{\max}	...	maximální přípustný tlak tekuté výplně	[Pa]
$R_{p0,2}$...	smluvní mez kluzu	[Pa]
d	...	vnitřní průměr trubky	[m]

elastické výplně

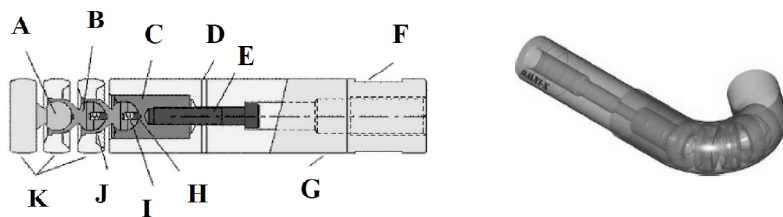
Daná výplň je velmi vhodná při využití u technologie protlačování, která se používá především pro tenkostěnné polotovary. Nejvíce využívaná je vložka tvořená polytanem (polyuretanovým elastomerem). Má výborné těsnící vlastnosti v pracovní oblasti. Oproti kapalině není třeba utěšňovat na koncích trubky.

sypké výplně

Jsou ve velké míře využívány při technologii ohýbání za tepla, kde se využívá sklářského písku. V tomto případě musí být písek naprosto suchý, aby při ohřevu nedocházelo k vypařování vodních par, které by vedly k vysokému nárůstu tlaků v místě ohybu a následným deformacím. Před zahájením procesu ohýbání bývá plnidlo v trubce důkladně vibračně setřepáno, tím se docílí požadovaného účinku při zabraňování tvorby defektů. Další možností je využití například ocelových broků. Výplň v podobě broků se však musí používat jen v těch případech, kdy v trubce nebude při pracovním procesu proudit vysokorychlostně kapalina a stěna tedy nebude vystavena velkým vnitřním tlakům. Důvodem k tomuto omezení je vznik otisků (důlků) od tvrdých broků na vnitřním obvodu trubky při realizaci ohybu. Při užití sypké výplně musí být obrobek po dokončení operace tváření velmi pečlivě vypláchnut.

mechanické výplně:

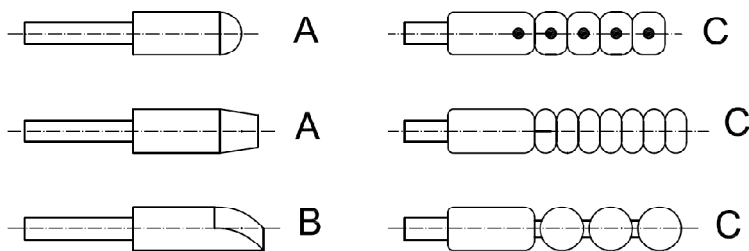
Tento druh výplně tvoří skupinu takzvaných trnů, které mají ve většině případů specifickou konstrukci a působí přímo v místě plastických deformací trubky. Výplně tvoří kovové a silonové vložky, které jsou tvořeny různými segmenty (kulové, půlkulové, válcové). Další možností jsou hustě vinuté pružiny. Nejčastěji jsou však v praxi využívány právě pevné nebo ohebné kovové stabilizační trny. Vůle mezi pevným trnem a trubkou nesmí přesahovat 20% z tloušťky stěny, pro přesnější ohyby se tato vůle snižuje. Při ohýbání jiných než kruhových průřezů, se vůle volí nižší tak aby se zabránilo propadu stěn.



Obr. č. 14: ilustrační schéma segmentového trnu [7]

legenda:

- A koncový článek
- B střední dělený článek
- C trnový článek
- D mazací díry
- E šroub
- F drážka na klíč
- G tělo trnu
- H kulička
- I pružinka
- J pojistný kroužek



Obr. č. 15: tvary trnů [1]

legenda:

- A kulový tvar
- B lžícový tvar
- C článkový a kloubový tvar

Základní typy kovových stabilizačních trnů:

- pevné
 - kolíkové - rovné čelo
 - tvarové - přesně kopíruje poloměr ohybu

Princip ohýbání spočívá v přetahování stěny trubky přes konec trnu, což vede ke zpevnování stěny a minimalizaci zploštění kruhového průřezu trubky. Ustavení trnů v dutině trubky bývá mírně za bodem ohybu a velikost tohoto ustavení se určuje na základě tabulek.
- pružné (vrstvené)

Kovové plátky přivařeny k tělu trnu, ohyb probíhá v jedné rovině, především pro ohyb trubek čtvercových průřezů. Při operaci ohýbání se ohýbá trn zároveň s trubkou (horší vkládání a vyjímání trnu).
- segmentové
 - kulové - spoj články nebo kulovými klouby

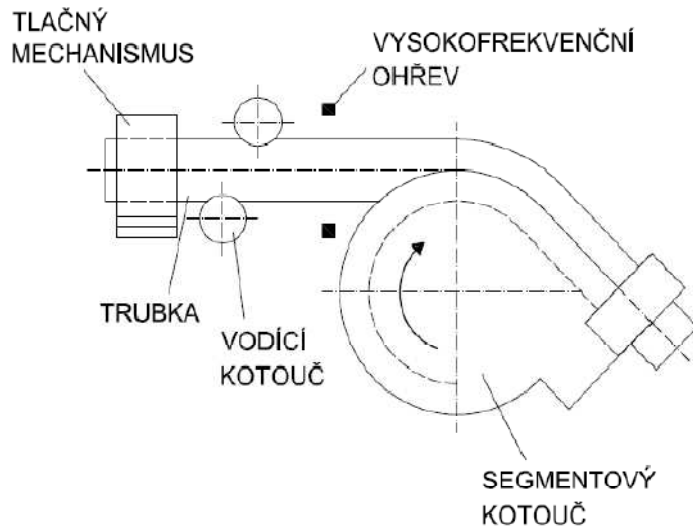
Trn spojený články je ohebný jen v jedné rovině, kulovými klouby ve všech rovinách. Spojení kulovými klouby je v dnešní době nejpoužívanější, trny mají vysokou tuhost, široké rozmezí průměrů trubek (od 5 mm), průměr segmentů je menší než průměr těla trnu. Kulové trny se rozdělují do tří podskupin podle použití pro různou šířku stěny (závislé na zmenšování vybrání segmentů, zužování segmentů):

 - standardní - pro ohyb tlustostěnných trubek, hustota bodů dotyku je malá
 - pro tenkostěnné trubky - hustota bodů dotyku je vyšší, důkladná opora stěny trubky
 - pro velmi tenkostěnné trubky - segmenty mají menší tloušťku, vyšší hustota bodů dotyku
 - s lankem - spoj tvořen lankem

Možnost ohybu ve všech rovinách. Nevýhodou je menší tuhost a obtížnější vyjímání trnu z ohnutého dílu.

"Užití trnů se stanovuje například na základě nomogramu uvedeného příloze č.2."

4.2 OHYB KOMBINOVANÝ S OSOVOU TLAKOVOU SÍLOU



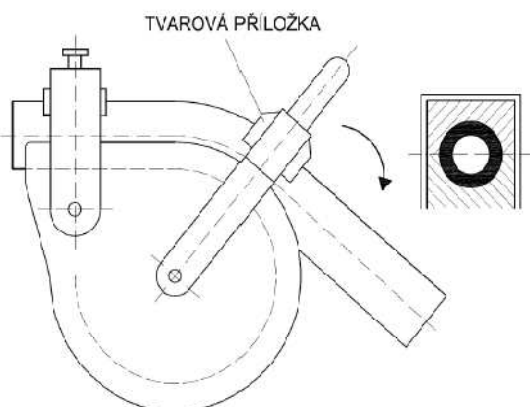
Obr. č. 16: schéma ohybu s osovou tlakovou silou [1]

tahového napětí v kritickém místě polotovaru. Více však hrozí ztráta stability materiálu na vnitřním poloměru ohybu, protože i zde probíhá přísun materiálu a zvyšování tlakových napětí.

5 TECHNOLOGICKÉ METODY OHÝBÁNÍ TRUBEK [1][2][5][7][9]

Jedno z rozdělení technologií tváření je rozdělení na skupiny na základě teploty (za studena a za tepla), přičemž primární je ohýbání za studena kvůli ekonomickým a časovým nákladům. Ohýbání za tepla se provádí pouze v případě, není-li materiál obrobku dostatečně houževnatý, popřípadě byly-li by zapotřebí k provedení požadovaného ohybu příliš velké síly. Při ohýbání trubek se využívají přípravky, které jsou určeny pro jeden stanovený vnější průměr obrobku a jeden daný poloměr ohybu. Současné procesy ohýbání trubkových součástí se dají rozdělit do těchto pěti základních metod:

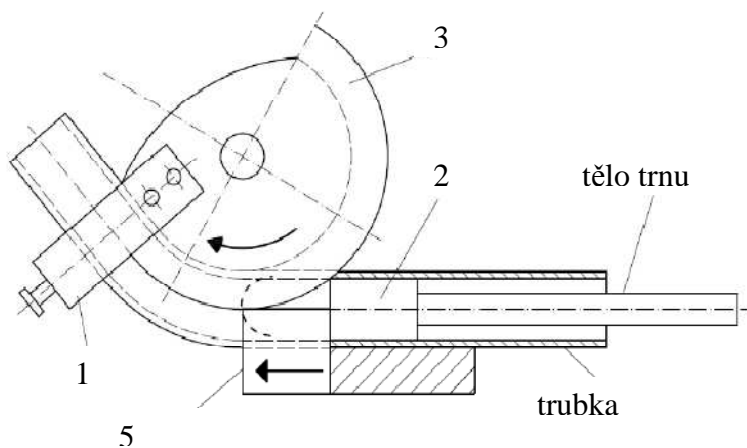
ohyb nabalováním



Obr. č. 17: schéma ohybu nabalováním [1]

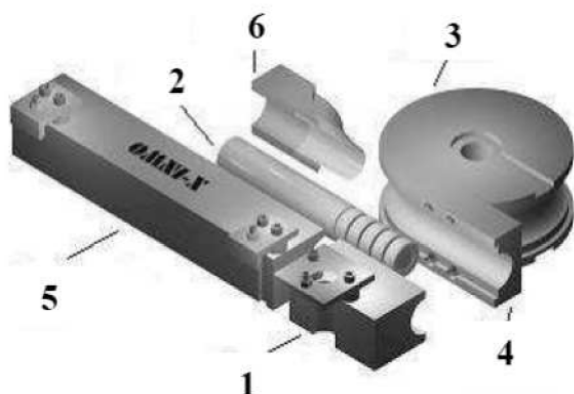
Řadí se do kategorie technologie ohýbání za studena. V případě ručního ohybu se využívá především tekuté výplně (viz. kapitola 4). Používá se pro ohyb tenkostěnných trubek rozměrových charakteristik $D < 20 \text{ mm}$ (některé podklady uvádějí do maximální hodnoty 30 mm) a $R_{\min} \geq 2,5 \cdot D_0$. Ohyb je prováděn pouze v jedné rovině a to tak, že segmentový kotouč je umístěn napevno, tvarová příložka je pohyblivá a působením přítlačné síly se trubka tvaruje do požadovaného tvaru. Zpravidla bývají přípravky upnuty do svěráku. Další možností ohýbání nabalováním je použití ohýbačky s mechanicky poháněnou otočnou "nabalovací" pákou (většinou hydraulika).

ohyb navíjením



Obr. č. 18: schéma ohybu navíjením [1]

po celý úkon ohybu trubky. Tento způsob je v praxi hojně využíván v případech strojních ohýbaček. Do sady nástrojů (zobrazené na obrázku č.19) pro daný proces ohýbání patří:



Obr. č. 19: nástrojová sada OMNI-X [7]

- upínací čelist "1"
- vnitřní trn "2"
- navíjecí (ohýbací) matrice "3"
- čelist matrice "4"
- přitlačná lišta "5"
- vyhlazovací lišta "6"

Mezi základní sadu nástrojů pak patří ohýbací matrice, které jsou specifické pro každý průměr trubky, způsob uchycení v přípravku a poloměr ohybu. Upínací lišty (čelisti), které musí mít stejnou délku i povrchovou úpravu jako upínací úsek použité ohýbací matrice a jsou také

specifické pro použité průměry polotovaru. Lišty mají drážku, která má rozměry $(D - 0,1 \cdot t)$ polotovaru. Přitlačné lišty, které zamezují průhybu trubky při ohýbacím procesu a navíjejí trubku do drážky matrice, vyvíjejí stálý tlak na polotovar, který je největší v místě tangenty ohybu (bod ohybu). Vyhlažovače se používají zejména při ohybu tenkostěnných trubek, zabraňují zvlnění na vnitřním poloměru polotovaru.

V případě mechanických ohýbaček se metoda používá pro ohyb trubek o průměrech $(D = 12 \div 250 \text{ mm})$ pro úhel ohybu až 180° . Ohyb je realizován dotlačením kalibračního trnu do místa ohybu ve vzdálenosti dle tabulek. Mezi jedny z nejvýhodnějších ohýbaček patří hydraulicky ovládané ohýbačky s programovým řízením. Daný způsob ohýbání je velmi náchylný na vznik trhlin na tažené straně ohýbané součásti při nedodržení optimálních podmínek ohybu které ovlivňují:

- tvar průřezu trubky
- pevnostní a deformační charakteristiky průřezu trubky
- kvalita uchycení polotovaru
- geometrie a poloha trnu
- geometrie a drážky matrice
- mazání trnu a povrchu lišt
- poloha a tvar vyhlazovací lišty

- tlak přítlačné lišty
- otěruvzdornost a hladkost povrchu drážek, které jsou v přímém kontaktu s polotovarem

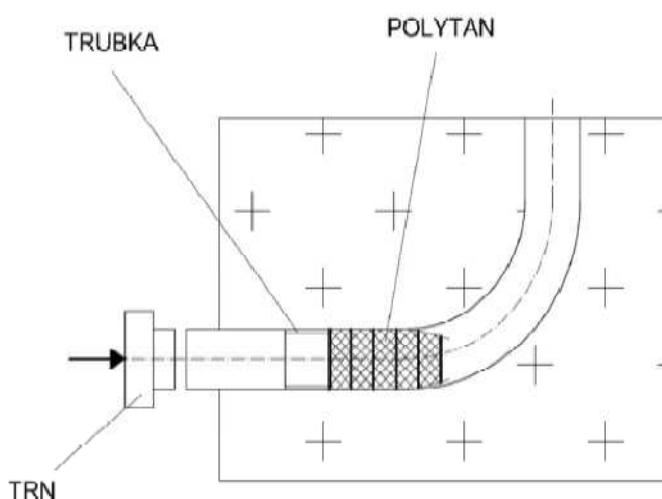
ohyb zakružováním

Daná metoda je vhodná pro ohyb trubek větších průměrů a především tlustostěnných polotovarů, u kterých nevedí mírné zploštění (doprava médií v tepelných a chemických zařízeních apod.). Princip zakružování trubek je obdobný jako princip zakružování plechů až na výjimku posuvu, který u plechu zajišťují třecí síly symetricky uložených válců, zatímco u procesu ohybu trubek je posuv zajištěn posuvovou silou působící na konec polotovaru (při posuvu přes kladky by mohlo docházet k deformaci průřezu trubky). Ohyb se pak uskutečňuje na základě ustavení profilovaných otočných válců.

ohyb na lisu

Tato metoda je vhodná pro výrobu dílů jak s jedním, tak s více ohyby. A to buď v jednom kroku, nebo při postupném ohýbání. Stroj funguje na principu pohyblivého ohybníku (beranu), který polotovar přitlačí do spodní, nepohyblivé části zápustky. Zdvih beranu musí být dobře seřízen, aby nedocházelo k deformacím průměru. Tímto způsobem se dají zhotovovat velmi složité tvary v malém časovém úseku. Přední výhodou je však vysoká produktivita ohybu trubek o velkých průměrech (až 350 mm) do úhlu ohybu až 165°.

ohyb protlačováním



Druhou možností pro ohýbání krátkých tenkostěnných trubek tak, aby bylo dosaženo velmi ostrých ohybů, je technologie protlačování za studena do dělené zápustky, kde se jako výplň užívá polytanový kroužek. Jeden konec trubky je částečně uzavřen. Trn působí tlakovou silou pouze v místě polytanu a tím dochází k rozpěchování polytanové výplně. V místě, kde působí třecí síly mezi trubkou a polytanovou výplní je trubka "nesena" stejným směrem, kterým se pohybuje trn. Průřez trubky je zatěžován tlakovým napětím. Stěna trubky se napěchuje,

Obr. č. 20: schéma ohybu tlakem s využitím elastického média [1]

čímž je kompenzováno ztenčování. Ke zvlnění nedochází díky působení vysokého tlaku polytanu. Tímto způsobem se dají ohýbat trubky při zvětšení tloušťky stěny o (4 ÷ 30%).

ohyb s ohřevem

Pokud nelze využít žádné z dostupných metod ohýbání trubek za studena, je možné využít ohyb s ohřevem. Ohřev se zpravidla provádí kyslíko-acetylenovým plamenem přímo v místě ohybu. Více se nahřívá vnitřní strana poloměru ohybu. Proces ohýbání je vykonáván v přípravku, který přesně kopíruje námi požadovaný tvar. Výplň tvoří suchý sklářský písek (viz. kapitola 4). Výhody ohybu s ohřevem tvoří především snížení potřebné ohýbací síly a současně menší hodnoty odpružení. Nevýhody při použití dané technologie jsou zejména vyšší náklady související s ohřevem, potřebou velmi dobrého očištění obrobku a následným

tepelným zpracováním (rekrytalizační žíhání). Daná technologie je časově náročnější než konvekční metody ohýbání za studena a dosahuje se horší kvality povrchu.

ohyb tlakem

Polotovar je tlačěn do místa ohybu silou působící na volný konec trubky která je přeložena přes ohýbací matici. Tato metoda je vhodná pro ohyb materiálů s větší tuhostí vůči vybočení. Tento typ ohýbání má dvě fáze:

1. Předehnutí trubky: Trubka je vysunuta do určité vzdálenosti za matici, ohybová kladka začne klesat ve vertikální poloze a přitlačí trubku do drážky ohýbací matrice. Moderní stroje předehnutí realizují nabalováním pomocí ohýbací kladky umístěné na otočné páce.
2. Realizace ohybu tlakem: Trubka je tlačena osovou tlakovou silou pomocí mechanismu na jejím konci do místa ohybu. Styl tohoto ohýbání je velmi podobný zakružování, které je uskutečňováno díky poloze nastavené na ohýbací kladce.

Daná metoda v kroku č. 2 vyvíjí osový tlak na materiál, tím se snižují tahová napětí a dochází k posunu neutrální osy směrem k vnější straně ohybu na rozdíl od jiných konvenčních metod.

ohyb laserem

Tato metoda je založena na způsobu tváření pomocí lokálních plastických deformací v tlaku bez působení vnější síly. Laserový paprsek o tloušťce větší, než je tloušťka stěny obrobku (zpravidla desetinásobek pro stejnoměrné nahřívání) nahřívá danou trubku rotující kolem své osy přibližně o 180°. Tepelná roztažnost je omezena okolním materiálem a tak vzniká v ohřívané oblasti tepelně indukovaná tlaková napětí (axiální a obvodová). Axiální napětí je větší a tedy i primárně zodpovědné za zesílení tloušťky stěny trubky. Při průběhu ochlazování oblasti, na kterou působil laserový paprsek, se začínají zkracovat vlákna v osovém směru a vzniká ohyb.

Metoda ohybu laserem má menší vznik ovality, výrazně menší ztenčení vnější strany ohybu, lze ji jednoduše zautomatizovat, má nízké náklady na výrobu (využívá se v malosériové a prototypové výrobě) a lze s ní tvářet i materiály, které by se konvenčními metodami musely často žíhat. Minimální poloměr ohybu je závislý na šířce paprsku, tloušťce a vnějším průměru trubky a vlastnostech materiálu (zejména schopnost zpevňování).

flexibilní ohýbání



Obr. č. 21: proces flexibilního ohybu [9]

Ohyb se uskutečňuje posouváním trubky ve válci a tvarováním pomocí pohyblivého ohybníku umístěném za válcem (vzdálenost a naklonění ohybníku ovlivňuje poloměr ohýbání). Touto metodou jsme schopni vytvářet složité prostorové ohyby a ohyby navazující jeden na druhý bez rovných částí mezi nimi (složité u konvenčních metod). Ohybníky jsou specifické pro různé průřezy trubek (lze ohýbat i jiné než kruhové průřezy). Daná metoda se uplatňuje v designu, automobilním a nábytkovém průmyslu.

ohyb pomocí vypínání

Ohýbání za pomoci přídavného tahového napětí. Polotovár je upnut mezi čelisti a napínán na hodnotu meze kluzu. Proti napnuté trubce je posouván ohybník, který má námi požadovaný tvar. Polotovár je namáhán tahem po celém průřezu (tloušťka stěny se zmenšuje přibližně rovnoměrně jak na vnější, tak na vnitřní straně ohybu), tahové namáhání má také dobrý vliv na odpružení. Touto metodou lze vyrábět ohyby s nepravidelnou křivostí, malé poloměry ohybu, více ohybů v jednom cyklu. Náklady na nástroje pro tuto metodu jsou však vysoké a musí se uvážit, zda bude v daném provozu návratnost investice.

6 VÝROBA TRUBEK [4][5]

Výroba trubek se dělí do dvou skupin. Jedná se o výrobu bezešvých a švových (svařovaných) trubek. Přičemž vhodnější pro následné ohýbání jsou trubky vyrobené bezešvou metodou do jejichž hlavních kategorií patří:

- výroba válcováním (2 fáze)
- výroba protahováním
- výroba dopředným protlačováním
- výroba děrováním

Vnější průměry bezešvých trubek se pohybují v rozmezí mezi 20 až 660 mm. Při procesu válcování je na výrobu požadovaného poloměru potřeba dvou operací. V první operaci proběhne výroba dutého tlustostěnného předvalku z původního plného materiálu. Při druhé operaci už dostáváme požadované průměry trubky.

7 OHÝBACÍ STROJE [7][10]

Ohýbací stroje se dělí do tří základních skupin podle způsobu ohýbání:

- ruční zařízení
- poloautomatické zařízení
- CNC zařízení
- speciální ohýbací zařízení

Výhody a nevýhody jednotlivých skupin jsou popsány v tabulce uvedené v příloze č.2.

ruční ohýbací zařízení



Obr. č. 22: ruční ohýbací zařízení [7]

Používá se především pro jednoduché ohyby, případně pro doohyby trubek v jedné ose. Dají se ohýbat pouze trubky menších průměrů, menší tloušťky stěny a trubky vyrobené z materiálů o nižších pevnostech, jako je hliník {Al} a nebo měď {Cu}. Pro komplikované doohyby jsou tato zařízení nezbytná.

poloautomatické ohýbací zařízení



Obr. č. 23: poloautomatické ohýbací zařízení [7]

Používá se pro ohýbání velkých sérií stejných trubek bez přestavení stroje. Mohou se ohýbat různé velikosti i materiály trubek. Při změně trubky se musí přestavit délky dorazů a doladit příslušné rozměry.

CNC ohýbací zařízení



Obr. č. 24: CNC ohýbací zařízení [7]

Používá se pro ohýbání složitých tvarů ve třech osách. Mohou se ohýbat různé velikosti i materiály. Jsou vhodné jak pro velké objemy trubek, tak pro malosériovou výrobu. CNC zařízení jsou uzpůsobena pro ohýbání velkých poloměrů, mají výkonné motory a převodovky. CNC ohýbací zařízení se dále dělí na:

- hydraulické ohýbačky
- elektrické ohýbačky

Hydraulické i elektrické ohýbačky mají společné podkategorie:

- jedna ohýbací hlava (levá, pravá, levo-pravá)
- dvě ohýbací hlavy
- otočná nebo přesuvná levo-pravá ohýbací hlava

speciální ohýbací zařízení

Používá se pro maximálně dva ohyby na jedné trubce a pro složité doohyby. Mohou se ohýbat různé velikosti i materiály. Jsou vhodné pro velké objemy trubek i pro malosériovou výrobu. Speciální ohýbací zařízení se dále dělí na:

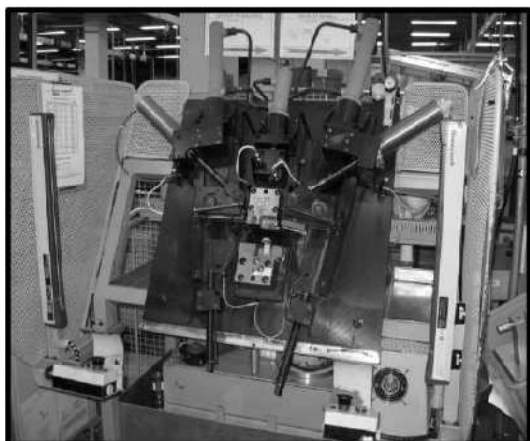
- rovinné ohýbačky
- ohýbačky na obtížné ohyby a doohyby

Rovinné ohýbačky se dále dělí na zařízení pro:

- jeden ohyb (jedno pozicové)
- dva ohyby (několika pozicové)

Ohýbačky na obtížné ohyby se dále dělí na:

- hydraulické
- pneumatické



Obr. č. 25: speciální ohýbací zařízení [7]

8 ZÁVĚRY

V práci byla shrnuta problematika popisující technologie při výrobním procesu ohýbání profilů. Byla shrnuta problematika ohledně technologie pro ohýbání profilových dílců s uzavřenou dutinou, především pro trubky kruhových průřezů. Zadaná práce má pouze teoretickou část, není v ní řešen žádný konkrétní příklad pro technologický postup ohybu trubek. Na základě podkladů společnosti Visteon-Autopal Nový Jičín sekce vývoje a výroby klimatizačních rozvodů pro automobilní průmysl, mi bylo umožněno zhodnocení výhod a nevýhod nejčastěji používaných ohýbacích strojů v daném odvětví které jsou přehledně zahrnuty v příloze č.1. Budoucnost technologie ohýbání trubek v ohledu na ekonomiku se nachází v automatizování výroby. Snižuje se vliv člověka (vnášené nepřesnosti), urychluje a zlevňuje se výroba.

V ohledu na technologii je to snaha o snížení výrobních chyb (ohýbání laserem), zmenšování poloměru ohybu (ohýbání s přídavnou tlakovou silou) a přímé napojování jednotlivých úseků ohybů (flexibilní ohýbání).

Nejvíce používanou technologií v průmyslovém odvětví, je technologie pro ohyb navíjením za použití trnů, která je optimálním řešením při ohledu na kvalitu, rychlost a ekonomičnost výroby. Metoda je velmi univerzální a dá se snadno automatizovat což je směr kterým se udává většina velkých světových firem.

Práci je možno využívat i jako studijní podklady pro problematiku technologie ohýbání. Forma interaktivního pdf byla přidána do příloh na CD přiloženém u závěrečné práce.